



รายงานการวิจัย

เครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยฟัซซี่ลอจิกสำหรับ  
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส

Auto Voltage Regulator with Fuzzy logic for three Phase Generator

6000 49284

RMUTSV



SK071025

สัญญา ผาสุข

621.31

น 555

2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

งบประมาณเงินรายได้ประจำปี พ.ศ. 2552

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและออกแบบการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส ขนาดกำลัง 150 KW ให้คงที่ด้วยหลักการควบคุมแบบฟีดแบ็คที่ปรับจูน โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 16F877 ทำการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดกระตุ้นเพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ผลการวิจัยพบว่าสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ ที่ระดับแรงดัน 395 โวลต์ระหว่างสาย ที่สภาวะโหลดคงที่และสภาวะโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

## **Abstract**

The research paper presents the study and design the auto voltage regulator with fuzzy logic for three phase 150 kW generator. The PIC 16F877 micro controller with fuzzy logic method is used to control the current that apply to existing coil. This method can regulate the voltage when load change with error less than 1 %



## กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้ได้ดำเนินการมาจนสำเร็จลุล่วงนั้น เกิดจากความร่วมมือของคณะวิจัย แม้ว่าจะมีเวลาในการทำวิจัยกันน้อย แต่ก็สามารถจัดสรรเวลาจึงสามารถช่วยกันกระทั่งสำเร็จลุล่วง และทั้งนี้ได้รับการสนับสนุนจากสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ให้การสนับสนุนทั้งสถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย และงานวิจัยนี้มีขึ้นมาได้เนื่องจากการสนับสนุนทุนอุดหนุนการทำวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

สัญญา ผาสุข



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2. การควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	3
2.1 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	3
2.1.1 ส่วนประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กหมุน	3
2.1.2 เอ็กไซเตอร์	5
2.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	6
2.2.1 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยมือ	6
2.2.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยระบบอัตโนมัติ	6
2.3 วงจรเรียงกระแส 1 เฟสครึ่งคลื่นที่ควบคุมได้	7
2.3.1 กรณีโหลดเป็นตัวต้านทาน	8
2.3.2 กรณีโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ	10
2.3.2 กรณีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ	15
2.3.4 กรณีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำและมีไดโอดฟูลบริล	18
2.4 ฟิชชี่ลจิก	20
บทที่ 3. การออกแบบระบบและพัฒนาโปรแกรม	28
3.1 การออกแบบระบบฮาร์ดแวร์	28
3.1.1 วงจรวัดระดับแรงดัน	28
3.1.2 วงจรวัดมุมเฟส	31

3.1.3	วงจรประมวลผล	32
3.1.4	วงจรควบคุมกระแสฟลักคอยล์	33
3.2	การออกแบบซอฟต์แวร์	37
บทที่ 4.	การทดลอง	46
4.1	ผลการทดลองของวงจรต่างๆในระบบ	46
4.1.1	การทดลองวงจรวัดระดับแรงดัน	46
4.1.2	การทดลองวงจรวัดมุมเฟส	49
4.1.3	การทดลองวงจรควบคุมกระแสฟลักคอยล์	50
4.2	ผลตอบสนองการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	51
4.2.1	ผลตอบสนองการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลด	53
4.2.2	ผลตอบสนองการรักษาระดับแรงดันขณะมีโหลด	54
4.2.3	ผลตอบสนองของการรักษาระดับแรงดันขณะโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด	56
บทที่ 5.	สรุปผล	60
	บรรณานุกรม	61
	ภาคผนวก	62

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
2-1	4
2-2	4
2-3	5
2-4	6
2-5	7
2-6	8
2-7	10
2-8	11
2-9	13
2-10	13
2-11	15
2-12	18
2-13	19
2-14	21
2-15	24
2-16	24
2-17	25
3-1	28
3-2	29
3-3	30
3-4	30
3-5	31
3-6	32
3-7	33

3-8	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดซิงโครนัส ขนาด 155kW	34
3-9	วงจรควบคุมกระแสฟลักคอยล์	34
3-10	วงจรเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า	35
3-11	บอร์ดเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยพีซีลจิก	36
3-12	ขั้นตอนการประมวลผลของพีซีลจิกขั้นตอนที่ 1	38
3-13	ขั้นตอนการประมวลผลของพีซีลจิกขั้นตอนที่ 2	38
3-14	ขั้นตอนการประมวลผลของพีซีลจิกขั้นตอนที่ 3	38
3-15	ขั้นตอนการประมวลผลของพีซีลจิกขั้นตอนที่ 4	39
3-16	บล็อกคอนโทรลของโปรแกรม	39
3-17	การทำงานของโปรแกรม	40
4-1	ตำแหน่งการวัดสัญญาณต่าง ๆ ของวงจรวัดระดับแรงดัน	46
4-2	ตำแหน่งของการวัดสัญญาณของวงจรขยายแรงดัน	47
4-3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของวงจร ตรวจวัดระดับแรงดัน	48
4-4	ตำแหน่งการวัดสัญญาณต่าง ๆ ของผลการทดสอบวงจรวัดมูมเฟส	49
4-5	ผลการทดสอบเอาต์พุตของวงจรวัดมูมเฟส	49
4-6	เปรียบเทียบมูมเฟสของแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรวัดมูมเฟส	50
4-7	การวัดสัญญาณต่าง ๆ ของผลการทดสอบวงจรควบคุมกระแสฟลักคอยล์	50
4-8	แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมฟลักคอยล์	51
4-9	เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 155 kW	52
4-10	ถังน้ำเกลือที่ใช้ทำการทดลอง	52
4-11	ไดอะแกรมวงจรการทดลอง	52
4-12	กราฟแสดงผลตอบสนองในสถานะไม่มีโหลดต่ออยู่	53
4-13	กราฟแสดงผลตอบสนองในสถานะโหลดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	55
4-14	ผลตอบสนองของการรักษาระดับแรงดันขณะโหลดเปลี่ยนแปลงอย่าง ทันทีทันใด	57
4-15	การทดลองขณะจุ่มก้านอิเล็กโทรดในถังน้ำเกลือ	59



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

พลังงานไฟฟ้าสำรองที่มีใช้ในหน่วยงานต่างๆ ที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าทดแทนเมื่อเกิดการขัดข้องของกระแสไฟฟ้าปกติที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคส่งจ่ายมาให้ในส่วนใหญ่มักจะใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Generator) ที่ใช้เครื่องยนต์เป็นต้นกำลังผลิตกระแสไฟฟ้าจ่ายทดแทนให้กับหน่วยงานที่ติดตั้งระบบนี้ไว้โดยอัตโนมัติ ซึ่งระดับแรงดันไฟฟ้าที่จะผลิตออกมานั้นจะต้องมีระดับแรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ต่อเฟส หรือ 380 V Line to Line โดยระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต้องถูกควบคุมให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าง่ายดังกล่าว ซึ่งโดยขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเริ่มทำงานจะมีแรงดันไฟฟ้าอยู่ไม่มาก และหากมีการใช้โหลดจะทำให้แรงดันไฟฟ้าตก จำเป็นต้องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า โดยเครื่องควบคุมที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่มักจะเป็นแบบอะนาล็อก ซึ่งไม่ทันสมัย และหากต้องการเครื่องควบคุมที่เป็นระบบดิจิทัล จะต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง

ในงานวิจัยนี้จะนำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์มาตรวจจับระดับแรงดันที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแล้วทำการควบคุมให้ได้ระดับแรงดันที่ต้องการด้วยระบบควบคุมแบบพีซีซีลอจิกที่มีการประมวลผลแบบดิจิทัล โดยการควบคุมกระแสฟีดแบ็ค ซึ่งเป็นตัวควบคุมแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งสามารถลดการนำเข้าและสร้างเทคโนโลยีให้กับประเทศไทย

### 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ได้ค้นแบบระบบควบคุมเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยพีซีซีลอจิกของ เครื่องกำเนิด ไฟฟ้าชนิด 3 เฟส

1.2.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยระบบพีซีซีลอจิก

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 สามารถควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้ผลิตแรงดันตามระดับแรงดันที่กำหนดได้

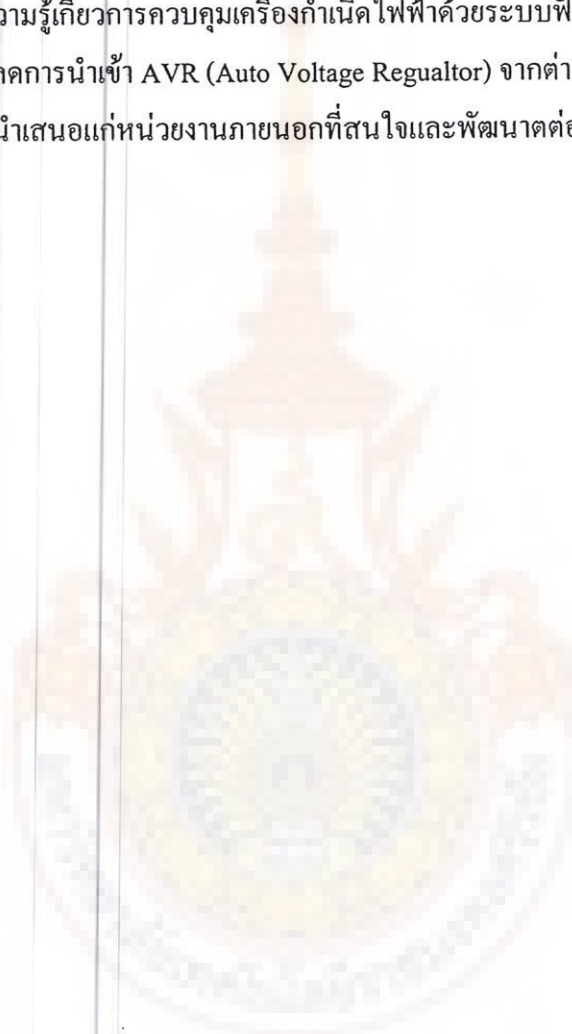
1.3.2 ใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต้นกำลังเป็นเครื่องยนต์

1.3.3 ขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่เกิน 155 KW 380 V

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ต้นแบบระบบเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยพีซีลจจิกของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด 3 เฟส
- 1.4.2 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการควบคุมเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยระบบพีซีลจจิก
- 1.4.3 สามารถลดการนำเข้า AVR (Auto Voltage Regulator) จากต่างประเทศ
- 1.4.4 สามารถนำเสนอแก่หน่วยงานภายนอกที่สนใจและพัฒนาต่อในเชิงพาณิชย์

ได้



## บทที่ 2

### การควบคุมแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องในการออกแบบการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยพีซีซึ่งล่อจิกสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสเพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่โหลดให้คงที่ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับโหลดอื่นเนื่องจากสาเหตุแรงดันไฟฟ้าเกิน โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

#### 2.1 โครงสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับและเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงต่างทำหน้าที่เหมือนกัน คือผลิตแรงดันไฟฟ้า แต่มีข้อแตกต่างกันคือ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง ขดลวดอาร์เมเจอร์ เป็นสวนหมุนและขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นส่วนที่อยู่กับที่ ส่วนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ อาจจะใช้ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นส่วนหมุน หรือส่วนที่อยู่กับที่ก็ได้ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับส่วนใหญ่เป็นแบบขั้วแม่เหล็กหมุนเพราะว่า

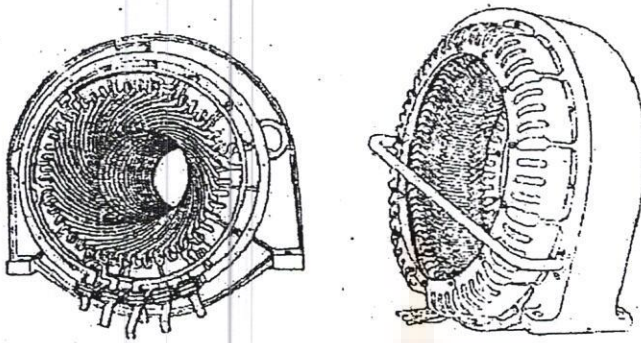
- 1) กระแสที่นำไปใช้กับโหลด ไม่ต้องผ่านสลิปริง จึงลดปัญหาเรื่องฉนวนไฟฟ้า
- 2) ผลิตแรงดันได้สูง 30 kv
- 3) ขนาดของส่วนหมุนลดลง

##### 2.1.1 ส่วนประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบขั้วแม่เหล็กหมุน

- 1) โครงเครื่อง (Stator frame)

เป็นส่วนรองรับส่วนประกอบอื่น ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำด้วยเหล็กหล่อในเครื่องที่มีการหมุนต่ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตและมีช่องระบายความร้อน ดังรูปที่ 2-1





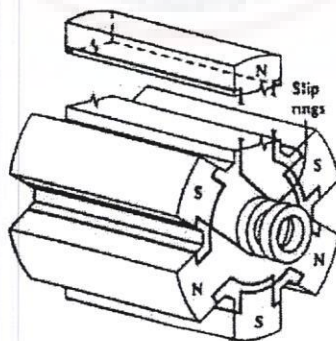
รูปที่ 2-1 โครงสร้างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

## 2) แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator core)

เป็นส่วนที่ใช้พันขดลวดสเตเตอร์ทำด้วยเหล็กแผ่นบาง ๆ (Laminated sheet steel) ปั้นเป็นร่อง (slot) สำหรับพันขดลวดเพื่อลดการสูญเสียจากกระแสไหลวน (Eddy Current) ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่แกนเหล็กสเตเตอร์มีช่องสำหรับให้อากาศผ่านเพื่อช่วยระบายความร้อน

## 3) ส่วนที่หมุนหรือขั้วแม่เหล็กหมุน (Rotating field)

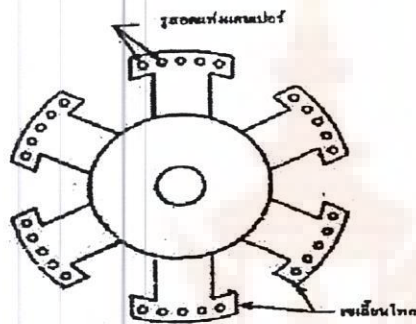
ขั้วแม่เหล็กหมุนแบบขั้วแม่เหล็กยื่น (Salient pole type) เหมาะสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยความเร็วปานกลาง โดยประกอบด้วยขั้วแม่เหล็กมากกว่า 4 ขั้วขึ้นไป โครงสร้างทำด้วยแผ่นเหล็กบาง ๆ (Laminated sheet steel) อัดเป็นแท่งยึดด้วยสลักเกลียว เพื่อลดความร้อนจากกระแสไหลวน ลักษณะของส่วนที่หมุน (Rotor) แบบนี้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโต ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ขั้วแม่เหล็กหมุนแบบขั้วแม่เหล็กยื่น

#### 4) ขดลวดแฉกเปอร์ (Damper winding)

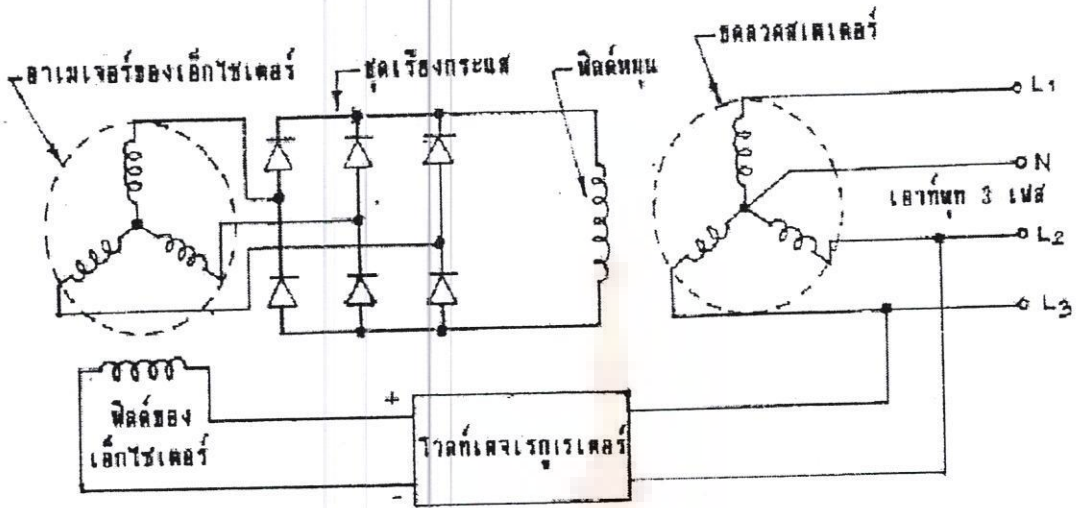
ที่ขั้วแม่เหล็กของส่วนที่หมุนจะมีร่องสำหรับฝังแท่งทองแดงและปลายแท่งจะทำการลัดวงจรด้วยทองทองแดงมีลักษณะเหมือนกับ โครงกระรอก(Squirrel-cage winding) ขดลวดแฉกเปอร์นี้ช่วยในการลดการแกว่งหรือสั่นขณะมีการเริ่มทำงาน ด้วยความเร็วไม่สม่ำเสมอ โดยขดลวดจะสร้างสนามแม่เหล็กออกมาต้านกับสนามแม่เหล็กหมุนทำให้การสั่นหรือการแกว่งหยุดได้เร็วขึ้น ลักษณะการติดตั้งขดลวดแฉกเปอร์ในส่วนหมุนดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 ขดลวดแฉกเปอร์

#### 2.1.2 เอ็กไซเตอร์(Exciter)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับต้องการแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับป้อนกระแสให้กับขดลวดสนามแม่เหล็ก แหล่งกำเนิดไฟฟ้าตรงที่นิยมใช้กันคือ แบบเฟลต คอมปาวด์-เวด(Flat Compound-Wound D.C. Generator) ซึ่งมีคุณสมบัติคือ แรงดันที่ผลิตและความเร็วมีการเปลี่ยนแปลงน้อย และ เอ็กไซเตอร์ชนิดแบบไม่ต้องใช้แปรงถ่าน(Brushless Generator) หลักการทำงานโดยอาศัยแรงดันที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับขนาดเล็ก แรงดันที่ได้จะผ่านชุดเรียงกระแสและชุดกรองความถี่ แรงดันที่ออกมาจะเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะป้อนเข้าไปยังขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนโดยตรง เพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่เริ่มทำงานผลิตแรงดันออกมา โดยแรงดันที่ได้เป็นระบบสามเฟส ซึ่งแรงดันส่วนหนึ่ง 1 เฟส จะป้อนกลับให้ขดลวดสนามแม่เหล็กหมุนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กโดยผ่านวงจรโวลท์ เรจเรกเรเตอร์ ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 วงจรไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิด 3 เฟส

## 2.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

ขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับทำงานนั้น โหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้แรงดันปลายสายเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับโหลด โหลดอาจหยุดทำงานหรือเผาไหม้ ดังนั้นจึงต้องควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับโหลด ซึ่งปัจจุบันมีวิธีการควบคุมได้หลายวิธี สามารถแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆคือ

- 1) การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยมือ
- 2) การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยระบบอัตโนมัติ

### 2.2.1 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยมือ

เป็นวิธีการที่นิยมใช้กับ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟสและมีกำลังเอาต์พุตไม่สูงนักการควบคุมโดยปรับเปลี่ยนความเร็วของตัวต้นกำลังให้น้อยลงหรือปรับกระแสที่ป้อนขดลวดสนามแม่เหล็กให้น้อยลง แต่ข้อเสียคือ ความแม่นยำน้อยและไม่รวดเร็ว

### 2.2.2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้าด้วยระบบอัตโนมัติ

เป็นวิธีที่นิยมใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ ที่มีกำลังเอาต์พุตสูง เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า เนื่องจากเมื่อโหลดเปลี่ยนแปลง กระแสโหลดและเพาเวอร์แฟกเตอร์ของโหลดจะเปลี่ยนแปลง ทำให้แรงดันไฟฟ้าปลายสายเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจำเป็นต้อง

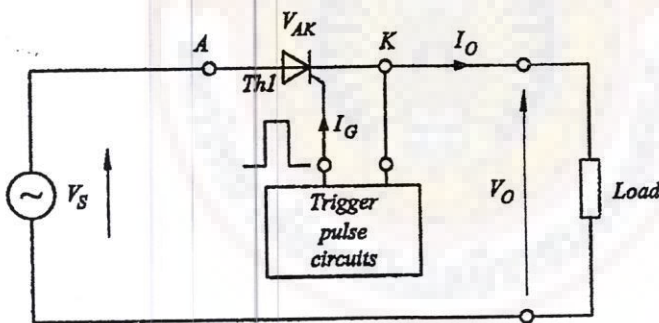


ปรับเปลี่ยนแรงดันเพื่อรักษาระดับให้คงที่ ตัวอย่างการควบคุม ซึ่งในปัจจุบันจะนิยมการควบคุมแรงดันแบบอัตโนมัติ ซึ่งมีความแม่นยำและรวดเร็ว มีการนำวงจรอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์มาควบคุม ทำให้ความแม่นยำสูงขึ้น

### 2.3 วงจรเรียงกระแส 1 เฟสครึ่งคลื่นที่ควบคุมได้

หมายถึง วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะใช้ไทรสเตอร์ เช่น เอสซีอาร์ เป็นสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแทนไดโอดทำให้สามารถกำหนดมุมจุดชนวนเกิดของไทรสเตอร์ได้ การควบคุมมุมจุดชนวนเกิดของไทรสเตอร์นั้นจะเป็นผลให้เกิดการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลดได้ นั่นคือ สามารถควบคุมแรงดันที่โหลดได้หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการแปลงผันแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (AC-To-DC Converter Controlled) ซึ่งจะนำมาควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดฟิวส์คอล์ยล์เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในการควบคุมการแปลงผันกำลังไฟฟ้ากระแสสลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสตรงที่โหลด ซึ่งสามารถปรับค่าแรงดันไฟตรงที่โหลดได้ต้องใช้ไทรสเตอร์ ซึ่งสามารถควบคุมโดยการป้อนพัลส์จุดชนวนที่ขาเกิดของไทรสเตอร์ด้วยวงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์จุดชนวน ซึ่งสามารถควบคุมการจุดชนวนขาเกิดของไทรสเตอร์ (มุม  $\alpha$ ) ได้ระหว่างมุม 0 องศาถึง 180 องศา



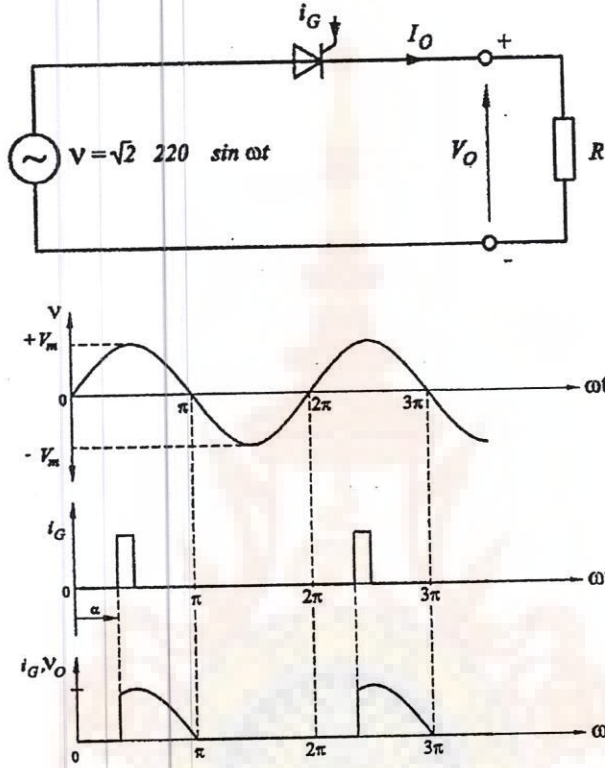
รูปที่ 2-5 วงจร 1 เฟสครึ่งคลื่นที่ควบคุมแรงดันได้

ในการศึกษาคุณลักษณะของวงจรเรียงกระแสที่ควบคุมได้นี้ กระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นกับโหลดจะขึ้นกับลักษณะของโหลดว่าเป็นโหลดชนิดใดการวิเคราะห์สมการการคำนวณค่ากระแสและแรงดันดังกล่าว จึงต้องแยกพิจารณากรณีโหลดที่แตกต่างกัน กล่าวคือ กรณีโหลดเป็นตัวต้านทาน กรณีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ และกรณีโหลดเป็นตัวต้านทานและเหนี่ยวนำ

### 2.3.1 กรณีโหลดเป็นตัวต้านทาน

ลักษณะของรูปคลื่นกระแสและแรงดันส่วนต่างๆ ของวงจรแสดงในรูปที่ 2-17

โดยกำหนดให้มุมจุดชนวนของไทรสเตอร์ (Firing angle) คือมุมแอลฟา ( $\alpha$ )



รูปที่ 2-6 วงจรและรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่โหลดต่อเมื่อมุมจุดชนวนคือมุม  $\alpha$

เนื่องจากรูปคลื่นของ  $V_O$  และ  $I_O$  มีเฟสตรงกัน (In phase) เพราะโหลดเป็นตัวต้านทานการคำนวณค่า  $V_O$  และ  $I_O$  จึงคำนวณได้จากการหาค่าเฉลี่ยของพื้นที่รูปไซน์มุมจุดชนวน ( $\alpha$ ) จนถึงมุมหยุดนำกระแส ( $\pi$ ) ดังสมการที่ 2-1

การคำนวณค่า  $V_{O(avg)}$ ,  $I_{O(avg)}$

$$\begin{aligned} V_{O(avg)} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\pi} \\ &= \frac{V_m}{2\pi} (-\cos \pi + \cos \alpha) \end{aligned}$$

$$V_{0(avg)} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (2-1)$$

$$I_{0(avg)} = \frac{V_{0(avg)}}{R} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (2-2)$$

การคำนวณค่า  $V_{0(RMS)}$ ,  $I_{0(RMS)}$

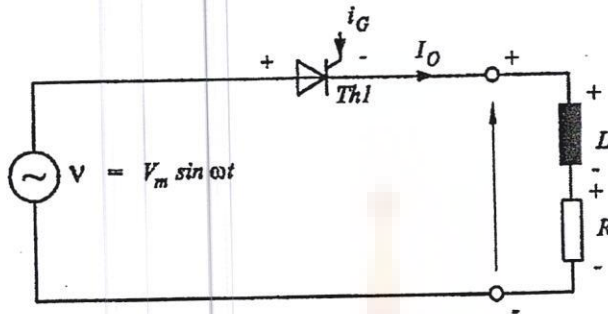
$$\begin{aligned} V_{0(RMS)} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} \\ V_{0(RMS)}^2 &= \frac{V_m^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{V_m^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \\ &= \frac{V_m^2}{4\pi} \int_{\alpha}^{\pi} d(\omega t) - \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\pi} \cos 2\omega t d(2\omega t) \\ &= \frac{V_m^2}{4\pi} \left( [\omega t]_{\alpha}^{\pi} - \frac{1}{2} [\sin 2\omega t]_{\alpha}^{\pi} \right) \\ V_{0(RMS)}^2 &= \frac{V_m^2}{4\pi} \left( \pi - \alpha - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \\ V_{0(RMS)} &= \frac{V_m}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\left( \pi - \alpha \right) + \frac{\sin 2\alpha}{2}} \quad (2-3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{0(RMS)} &= \frac{V_{0(RMS)}}{R} \\ &= \frac{V_m}{2\sqrt{\pi}R} \sqrt{\left( \pi - \alpha \right) + \frac{\sin 2\alpha}{2}} \quad (2-4) \end{aligned}$$

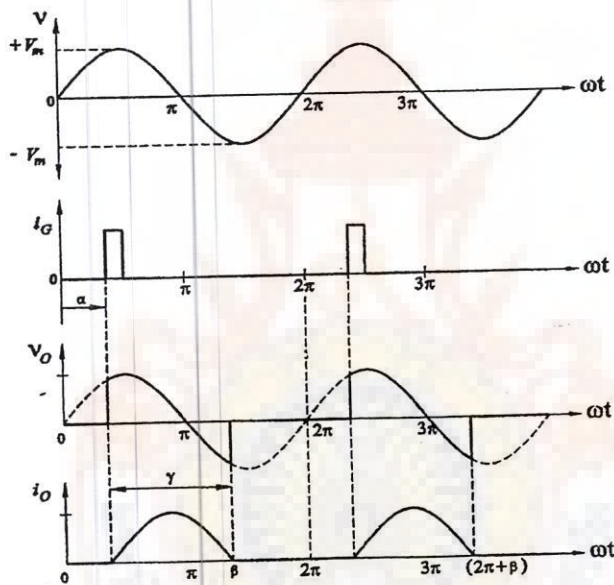
หมายเหตุ ค่า  $\pi$  และ  $\alpha$  ที่ไม่อยู่ในฟังก์ชันตรีโกณให้แทนค่าในหน่วยเรเดียน

(Radians)

### 2.3.2 กรณีโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ



(ก) วงจรเมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ



(ข) รูปคลื่นกระแสและแรงดันส่วนต่างๆ ของวงจร

รูปที่ 2-7 วงจรเรียงกระแส 1 เฟสครึ่งคลื่น เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ

กรณีโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำจะพบว่ามุมเริ่มนำกระแสของไทรสเตอร์เท่ากับมุมจุดฉนวน  $\alpha$  เหมือนกรณีโหลดตัวต้านทาน แต่มุมหยุดนำกระแสไม่เท่ากับมุม  $\pi$  เนื่องจากกระแสจะล้าหลังแรงดัน มุมหยุดนำกระแสจะเลขมุม  $\pi$  มาที่มุม  $\beta$  โดยกำหนดให้ค่ามุมที่ไทรสเตอร์นำกระแสทั้งหมดคือ  $\gamma$

ความสัมพันธ์ระหว่างมุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  เป็นไปตามสมการที่ 2-5

$$\beta = \gamma + \alpha \quad (2-5)$$

จากวงจรในรูปที่ 2-18 (ก)



$$V_L + V_R = V$$

$$\text{หรือ } L \frac{d_i}{d_t} + R_i = V_m \sin \omega t \quad (2-6)$$

เมื่อวิเคราะห์หาค่า  $i(t)$  จากสมการ (2-6) ได้ว่า

$$i(t) = \frac{V_m}{Z} (\sin \omega t - \theta) + Ae^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \quad (2-7)$$

$$\text{และค่าของ } Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$$

เมื่อพิจารณาสมการ (2-7) ขณะที่ Initial คือ  $\omega t = \alpha$  จะได้  $i = 0$  แทนค่าในสมการ (2-7)

$$i(t) = \frac{V_m}{Z} \left[ (\sin \omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{(R/L)(\alpha - \omega t)/\omega} \right] \quad (2-8)$$

และที่  $\omega t = \beta$  กระแสจะเป็น 0 อีกครั้ง ดังนั้นสมการ (2-8) จะเปลี่ยนไปดังนี้โดยตัด

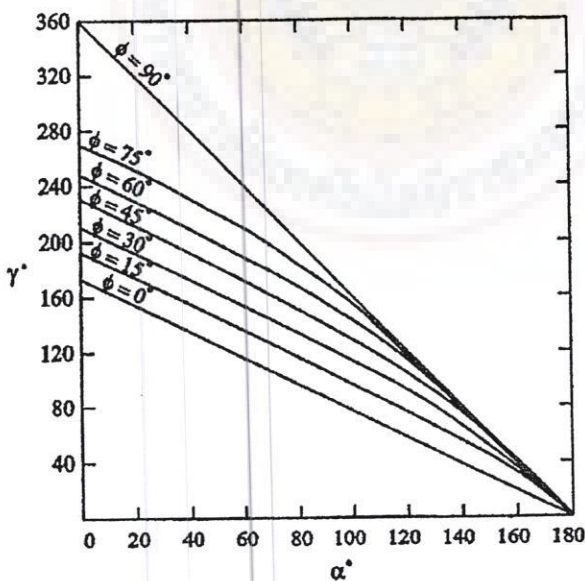
ค่าคงที่  $\frac{V_m}{Z}$  ออกไปและแทนค่า  $i(t) = 0$

$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\alpha - \theta) e^{(R/L)(\alpha - \beta)/\omega} \quad (2-9)$$

เมื่อพิจารณาจากรูปคลื่นในรูป 2-8(ข) จะเห็นว่าจำนวนมุนนำกระแสคือ  $\gamma$  และ

$$\beta = \gamma + \alpha$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ของมุน  $\gamma$  และ  $\alpha$  มาพล็อตกราฟ เมื่อค่ามุนต่างเฟสเปลี่ยนแปลงไปจาก  $\phi = 0$  องศา จนถึง  $\phi = 90$  องศา จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-8 กราฟความสัมพันธ์ของ  $\gamma$  และ  $\alpha$  เมื่อมุนต่างเฟส  $\phi$  เปลี่ยนไป

จากรูปที่ 2-8 เมื่อเราทราบค่ามุม  $\phi$  จากอัตราส่วนของ  $Z$  เราสามารถรู้ค่าของ  $\gamma$  และ  $\alpha$  ได้ทำนองเดียวกันเราจะรู้ว่ามีมุมหาค่ากระแสของไตรสเตอร์  $\beta$  ได้เช่นกัน

$$\text{เพราะ } \beta = \gamma + \alpha$$

จากสมการ (2-8) คือสมการกระแส (i) ที่เวลา (t) ใดๆ กรณีที่เป็นวงจรเรียงกระแส 1 เฟสครึ่งคลื่นแบบควบคุมได้โดยมีโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ เมื่อคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยผ่านโหลดหรือ  $I_{0(\text{avg})}$  คำนวณได้จาก

$$I_{0(\text{avg})} = \frac{V_m}{2\pi Z} \int_{\alpha}^{\beta} \left[ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha-t}{\omega}\right)} \right] d(\omega t) \quad (2-10)$$

และหาค่า  $I_{0(\text{RMS})}$  ได้จาก

$$I_{0(\text{RMS})} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi Z^2} \int_{\alpha}^{\beta} \left[ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha-t}{\omega}\right)} \right]^2 d(\omega t)} \quad (2-11)$$

จากสมการ (2-10) เมื่อยกเว้นการพิจารณาค่าคงที่ของสมการคือ  $\frac{V_m}{Z}$  จะเรียกสมการใหม่นี้ว่าสมการกระแส  $I_N$  ดังนี้

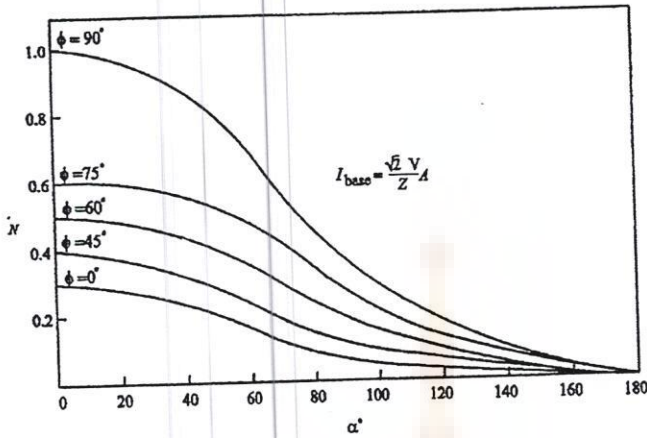
$$I_N = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \left[ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha-t}{\omega}\right)} \right] d(\omega t) \quad (2-12)$$

ค่าของ  $I_N$  จะแปรตามค่าของ  $\theta$  และค่าของมุมจุดชนวน  $\alpha$  เมื่อนำค่าของมุม  $\theta$  ตั้งแต่  $0^\circ$  จนถึง  $90^\circ$  มาแทนค่าจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $I_N$  และมุม  $\alpha$  ดังรูปที่ 2-10

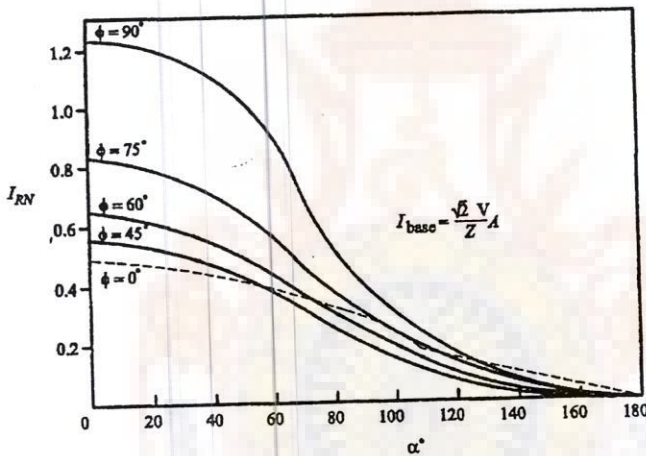
ในทำนองเดียวกันค่าของ  $I_{0(\text{RMS})}$  ก็แปรเป็นสมการ  $I_{RN}$  ได้ดังสมการ (2-13)

$$I_{RN} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \left[ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{\left(\frac{R}{L}\right)\left(\frac{\alpha-t}{\omega}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} d(\omega t) \quad (2-13)$$

เมื่อนำค่าของ  $\theta$  ตั้งแต่  $0^\circ + 90^\circ$  และค่ามุมจุดชนวน  $\alpha$  ตั้งแต่  $0^\circ + 180^\circ$  แทนลงไป จะได้ค่า  $I_{RN}$  ตามรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-9 กราฟ  $I_N = f(\alpha)$  เมื่อ  $\phi = 0^\circ$  ถึง  $\phi = 90^\circ$



รูปที่ 2-10 กราฟ  $I_{RN} = f(\alpha)$  เมื่อ  $\phi = 0^\circ$  ถึง  $\phi = 90^\circ$

และค่า

$$I_{0(avg)} = I_{base} I_N \quad (2-14)$$

$$I_{0(avg)} = \frac{V_m}{Z} I_N$$

$$I_{0(RMS)} = I_{base} I_{RN} \quad (2-15)$$

$$I_{0(RMS)} = \frac{V_m}{Z} I_{RN}$$

ดังนั้นสามารถคำนวณค่า  $I_{0(avg)}$  และ  $I_{0(RMS)}$  กรณีโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำได้โดยใช้รูปที่ 2-8, 2-9 และ 2-10

การคำนวณค่าแรงดันตกคร่อมโหลดเมื่อพิจารณารูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลดตัว  
ด้านทานและตัวเหนี่ยวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2-7(ข)

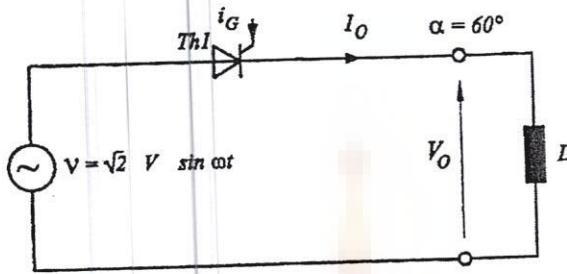
สมการแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยตกคร่อมโหลด  $V_{0(avg)}$  คือ

$$\begin{aligned}
 V_{0(avg)} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m \sin \omega t d(\omega t) \\
 &= \frac{V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{\beta} \\
 &= \frac{V_m}{2\pi} (-\cos \beta + \cos \alpha) \\
 V_{0(avg)} &= \frac{V_m}{2\pi} [\cos \alpha - \cos \beta] \tag{2-16}
 \end{aligned}$$

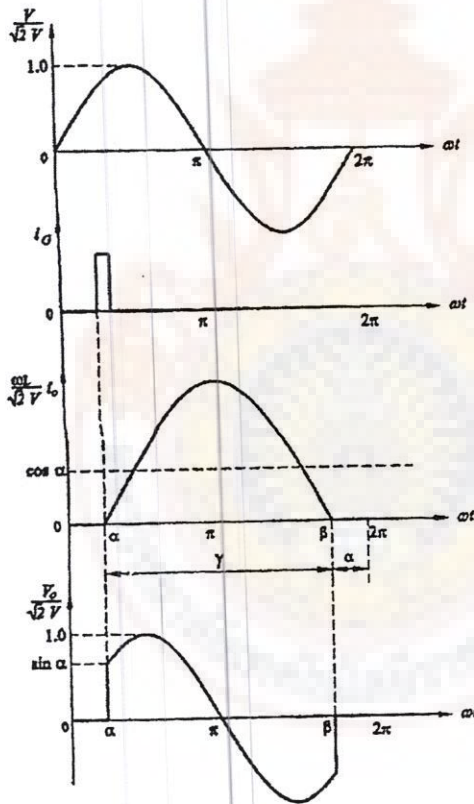
สมการแรงดันไฟฟ้าอาร์เอ็มเอสที่โหลด  $V_{0(RMS)}$  คือ

$$\begin{aligned}
 V_{0(RMS)} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} (V_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} \\
 &= \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \sin^2 \omega t d(\omega t)} \\
 V_{0(RMS)}^2 &= \left(\frac{V_m^2}{2\pi}\right) \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{\beta} (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \\
 &= \frac{V_m^2}{4\pi} \int_{\alpha}^{\beta} d(\omega t) - \int_{\alpha}^{\beta} \cos 2\omega t d(\omega t) \\
 &= \frac{V_m^2}{4\pi} \left[ \beta - \alpha - \frac{1}{2} (\sin 2\beta - \sin 2\alpha) \right] \\
 V_{0(RMS)} &= \frac{V_m}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\beta - \alpha + \frac{1}{2} (\sin 2\alpha - \sin 2\beta)} \tag{2-17}
 \end{aligned}$$

2.3.3 กรณีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ



(ก) โหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ



(ข) รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ส่วนต่างๆ ของวงจร

รูปที่ 2-11 แสดงวงจรเรียงกระแสหนึ่งเฟสครึ่งคลื่น ที่ควบคุมได้เมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ



กรณีโพลดมีค่า  $z = \omega L$  และมุม  $\phi = 90^\circ$  หรือ  $\frac{\pi}{2}$  เสมอ

จากสมการที่ (2-30)

$$i(t) = \frac{V_m}{Z} \left[ \sin(\omega t - \theta) - \sin(\alpha - \theta) e^{(R/L)(\alpha - \omega t)/\omega} \right]$$

เมื่อแทนค่า  $z = \omega L$  มุม  $\phi = 90^\circ$  และ  $R = 0$  ได้ว่า

$$i(t) = \frac{V_m}{\omega L} \left[ \sin(\omega t - 90) - \sin(\alpha - 90) e^0 \right]$$

$$i(t) = \frac{V_m}{\omega L} \left[ -\cos \omega t - (-\cos \alpha) \right]$$

$$i(t) = \frac{V_m}{\omega L} \left[ \cos \alpha - \cos \omega t \right] \quad (2-18)$$

การคำนวณค่ากระแส  $I_{0(avg)}$  และ  $I_{0(RMS)}$

$$I_{0(avg)} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \frac{V_m}{\omega L} [\cos \alpha - \cos \omega t] d(\omega t)$$

$$I_{0(avg)} = \frac{V_m}{2\pi\omega L} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} [\cos \alpha - \cos \omega t] d(\omega t) \quad (2-19)$$

$$I_{0(RMS)} = \sqrt{\frac{1}{2} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \frac{V_m}{\omega L} [\cos \alpha - \cos \omega t]^2 d(\omega t)} \quad (2-20)$$

เป็นการยุ่งยากในการคำนวณค่า  $I_{0(avg)}$  และ  $I_{0(RMS)}$  เมื่อพิจารณาสมการ (2-19), (2-20) ใช้วิธีหาค่า  $I_N$  และ  $I_{RN}$  แทนดังนี้

$$I_N = \frac{1}{2} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \frac{V_m}{\omega L} [\cos \alpha - \cos \omega t] d(\omega t) \quad (2-21)$$

$$= \frac{1}{\pi} [(\pi - \alpha)(\cos \alpha + \sin \alpha)]$$

$$= \frac{1}{\pi} (\pi - \alpha)(\cos \alpha + \sin \alpha)$$

ความสัมพันธ์  $I_N$  และค่า  $\alpha$  เป็นไปตามกราฟรูปที่ 2-9 กรณี  $\phi = 90^\circ$  และ  $I_{RN}$  ก็เช่นกัน กรณี  $\phi = 90^\circ$  ซึ่งค่า Normalized ของ  $I_{0(RMS)}$  หรือคือ  $I_{RN}$

$$I_{RN} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} [(\cos \alpha - \cos \omega t)^2 d(\omega t)]^{1/2} \quad (2-22)$$

ดังนั้นการคำนวณค่า  $I_{0(avg)}$  และ  $I_{0(RMS)}$  จึงใช้กราฟได้เช่นเดียวกับกรณีโพลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ แต่ให้พิจารณาที่  $\phi = 90^\circ$  เท่านั้น

$$\text{ดังนั้นค่า} \quad I_{0(avg)} = \frac{V_m}{\omega L} I_N \quad (2-23)$$

และ 
$$I_{0(RMS)} = \frac{V_m}{\omega L} I_{RN} \quad (2-24)$$

การคำนวณหาค่า  $V_{0(avg)}$  และ  $V_{0(RMS)}$  เมื่อพิจารณาจากรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ในรูปที่ 2-11(ข) จะพบว่า พื้นที่ของแรงดันส่วน A และ B เท่ากันดังนั้นแรงดันเฉลี่ยจึงมีค่าเป็น ศูนย์ดังสมการ (2-47)

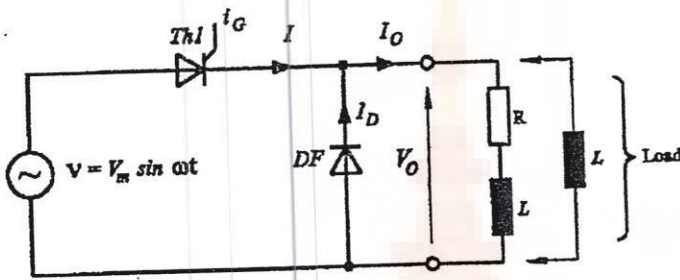
$$\begin{aligned} V_{0(avg)} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} V_m \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{V_m}{2\pi} [-\cos \omega t]_{\alpha}^{2\pi-\alpha} \\ &= \frac{V_m}{2\pi} [-\cos(2\pi - \alpha) + \cos \alpha] \\ &= \frac{V_m}{2\pi} [-\cos \alpha + \cos \alpha] \\ \therefore V_{0(avg)} &= 0V \end{aligned} \quad (2-25)$$

$$\begin{aligned} V_{0(RMS)} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} (V_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} \\ &= \sqrt{\frac{V_m^2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} \sin^2 \omega t d(\omega t)} \\ &= \frac{V_m}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\beta - \alpha + \frac{1}{2}(\sin 2\alpha - \sin 2\beta)} \\ \text{เมื่อ } \beta &= 2\pi - \alpha \\ &= \frac{V_m}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{2\pi - \alpha - \alpha + \frac{1}{2}[\sin 2\alpha - \sin(4\pi - 2\alpha)]} \\ \therefore V_{0(RMS)} &= \frac{V_m}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{[2\pi - \alpha + \sin 2\alpha]} \end{aligned} \quad (2-26)$$

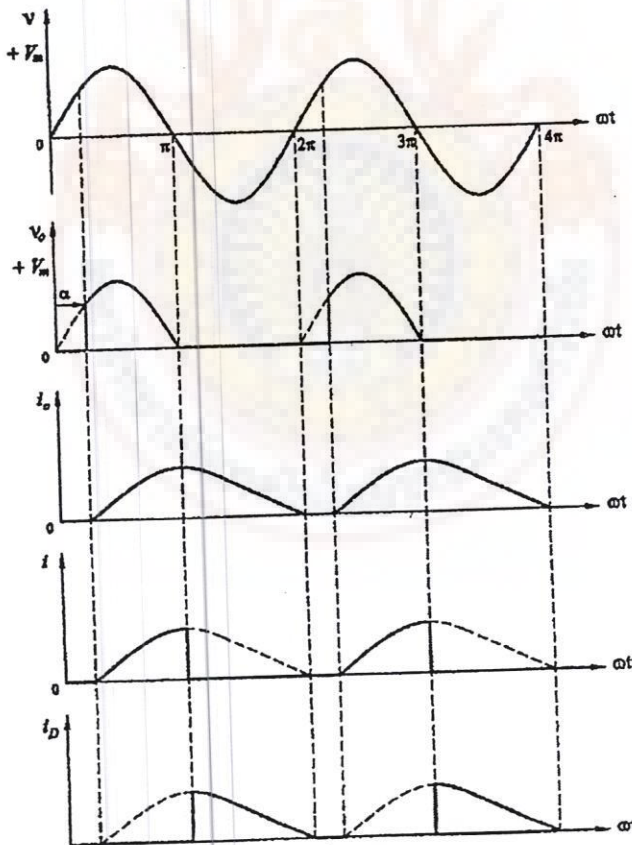


2.3.4 กรณีโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำและมีไดโอดฟูลวีล หรือ DF ที่ต่อขนาน โหลดเมื่อโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำ เช่น อาร์มเจอร์ของมอเตอร์หรือลวดสนามเป็นต้น เพื่อลดอัตราการเปลี่ยนแปลงของแรงดันต่อเวลา  $\left(\frac{dv}{dt}\right)$  ที่จะเป็นอันตรายต่อไทรสเตอร์ ดังรูปที่

2-12



(ก) วงจรเมื่อมีไดโอดฟูลวีลต่อขนานโหลด



(ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสส่วนต่าง ๆ ของวงจร

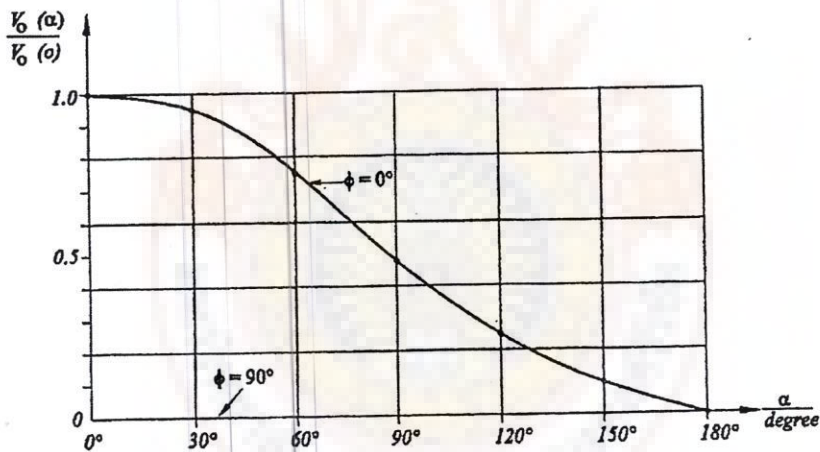
รูปที่ 2-12 วงจรเรียงกระแส 1 เฟส ครึ่งคลื่นที่ควบคุมได้มีไดโอดฟูลวีลต่อขนานโหลด

เมื่อพิจารณารูปคลื่นแรงดันที่โหลด  $V_0$  จะพบว่าเหมือนกรณีโหลดเป็นตัวต้านทาน ดังนั้นสมการการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย  $V_{0(avg)}$  และแรงดัน อาร์.เอ็ม.เอส  $V_{0(RMS)}$  จึงเหมือนกรณีโหลดเป็นตัวต้านทานคือ

$$\text{จากสมการ (2-1)} \quad V_{0(avg)} = \frac{1}{2\pi} (1 + \cos \alpha)$$

$$\text{จากสมการ (2-3)} \quad V_{0(RMS)} = \frac{V_m}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{(\pi - \alpha) + \frac{\sin 2\alpha}{2}}$$

เมื่อพิจารณารูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่านโหลดจะพบว่า เป็นผลรวมของกระแสที่ผ่านไทรสเตอร์ (Th1) คือ  $I$  กระแสที่ผ่านไดโอด (DF) คือ  $I_D$  สำหรับกระแส  $I_D$  คือกระแสที่เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำต้านกลับของโหลด โหลดออกจากโหลดผ่านแอนโอดของ DF ซึ่งจะไหลได้เมื่อไทรสเตอร์ (Th1) ไม่นำกระแสที่เวลา  $\omega t = \pi$



รูปที่ 2-13 กราฟแสดงคุณลักษณะการควบคุมของวงจรเรียงกระแส 1 เฟสครึ่งคลื่นที่ควบคุมได้เมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำเท่านั้น

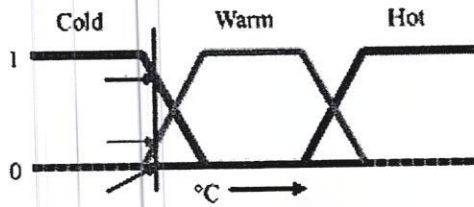
กราฟแสดงคุณลักษณะการควบคุม (Control characteristic curve) กราฟแสดงคุณลักษณะของการควบคุมของวงจรเรียงกระแส 1 เฟส ครึ่งคลื่นที่ควบคุมได้จะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างการควบคุมมุมจุดชนวนไทรสเตอร์ (มุม  $\alpha$ ) และขนาดของแรงดันเฉลี่ยที่โหลดโดยที่คิดค่าแรงดันจะคิดเป็นหน่วย (Per unit) หาได้จาก  $V_{0(\alpha)}/V_{0(0)}$  เมื่อ  $V_{0(\alpha)}$  คือแรงดันเฉลี่ยตกรวมโหลดที่มุม  $\alpha$  ใด ๆ และ  $V_{0(0)}$  คือแรงดันเฉลี่ยตกรวมโหลดที่มุม  $\alpha = 0^\circ$  โดยกราฟแต่ละเส้นขึ้นอยู่กับขนาดของมุมต่างเฟสของโหลด (มุม  $\phi$ ) เช่น กราฟที่มุม  $\phi = 0^\circ$  คือโหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำเพียงอย่างเดียวดังแสดงในรูปกราฟที่ 2-13

#### 2.4 ฟัชซีลอจิก (Fuzzy Logic)

เนื่องจากฟัชซีลอจิกเป็นการเรียนรู้การเขียนโปรแกรมควบคุมขั้นสูงที่พัฒนาเพิ่มเติมขึ้นมาเพื่อให้การอำนวยความสะดวกสบายทำได้มากขึ้น ฟัชซีลอจิกพัฒนาจาก ทฤษฎีเซตวิภาษ โดยเป็นการใช้เหตุผลแบบประมาณซึ่งแตกต่างจากการใช้เหตุผลแบบเด็ดขาดในลักษณะถูก/ผิด ใช่/ไม่ใช่ ของตรรกศาสตร์แบบฉบับ (classical logic) ตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้นสามารถถือเป็นการประยุกต์ใช้งานเซตวิภาษเพื่อจำลองการตัดสินใจของผู้เชี่ยวชาญต่อปัญหาที่ซับซ้อนค่าระดับความจริง ในตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้นมักจะสับสนกับค่าความน่าจะเป็นซึ่งมีแนวความคิดที่แตกต่างกัน ค่าระดับความจริงคลุมเครือนั้นใช้ในการระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซตแต่ค่าความน่าจะเป็นนั้นระบุความเป็นไปได้ของสภาพการณ์แต่ละรูปแบบที่อาจจะเกิดขึ้น ตรรกศาสตร์คลุมเครือนั้น สามารถระบุค่าความเป็นสมาชิกของเซต (set membership values) ด้วยค่าระหว่าง 0 และ 1 ทำให้เกิดระดับกึ่งในลักษณะของ สีเทา นอกจาก ขาว และดำ ซึ่งมีประโยชน์ในการจำลองระดับซึ่งสามารถระบุด้วยคำพูด "เล็กน้อย" "ค่อนข้าง" "มาก" โดยใช้ค่าความเป็นสมาชิกของเซตบางส่วนของตรรกศาสตร์คลุมเครือนี้มีความสัมพันธ์กับเซตวิภาษ (en:fuzzy set) และทฤษฎีความเป็นไปได้ (en:possibility theory)

ตรรกศาสตร์คลุมเครือ ถึงแม้ว่าจะได้รับการยอมรับค่อนข้างกว้างขวาง แต่ก็ยังถูกโต้แย้งจากบางกลุ่ม เช่นจากวิศวกรระบบควบคุม ในเรื่องของการอธิบายพฤติกรรมต่าง ๆ และ จากนักสถิติบางกลุ่มซึ่งเชื่อมั่นว่าทฤษฎีความน่าจะเป็น เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ที่เคร่งครัดเพียงวิธีเดียวในการจำลองความไม่แน่นอน (en:uncertainty) นอกจากนั้นแล้วก็ยังมีการวิเคราะห์วิจารณ์ว่า เซตวิภาษนั้นไม่ได้เป็นซูเปอร์เซตของทฤษฎีเซตสามัญ เนื่องจากฟังก์ชันภาวะสมาชิก นั้นกำหนดในรูปของเซตแบบดั้งเดิม





รูปที่ 2-14 ฟัซซี ลอจิก(Fuzzy Logic)

วิธีการใช้งานง่าย ๆ นั้นอาจใช้ในการจำลองช่วงย่อย ๆ ของตัวแปรที่มีค่าต่อเนื่อง เช่น การวัดอุณหภูมิในระบบห้ามล้อแบบกันล้อตาย อาจมีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของเซตหลายฟังก์ชันสำหรับอุณหภูมิซึ่งแบ่งเป็นหลายช่วง เพื่อควบคุมการห้ามล้อให้เหมาะสม โดยแต่ละฟังก์ชันจะทำการส่งค่าอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ไปเป็นค่าความจริงในช่วง 0 ถึง 1 ซึ่งค่าความจริงเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมการห้ามล้อ

ในรูป cold (เย็น) warm (อุ่น) and hot (ร้อน) เป็นฟังก์ชันในการส่งค่าระดับอุณหภูมิที่แต่ละจุดของอุณหภูมิจะมีค่าความจริง 3 ค่า ซึ่งเป็นค่าของแต่ละฟังก์ชัน ซึ่งค่าความจริงทั้งสามนี้สามารถใช้ในการตีความค่าอุณหภูมิใด ๆ ว่า "ค่อนข้างเย็น" "อุ่นนิด ๆ" "ไม่ร้อน" ตัวอย่างของการใช้งานที่ซับซ้อนขึ้น ก็คือ การใช้งานตรรกศาสตร์คลุมเครือในการแก้ความผิดพลาด (error correction) ประสิทธิภาพ (ว่าควรจะเป็น 0 หรือ 1) ค่าความควรจะเป็นอาจแบ่งเป็น 256 ระดับระหว่างระดับสูงสุดหมายถึง "ค่าควรจะเป็น 1 แน่نون" และต่ำสุดหมายถึง "ค่าควรจะเป็น 0 แน่نون" ตัวลอกรหัสสองตัวอาจวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับมาพร้อมกันได้เป็นค่าความควรจะเป็นที่ต่างกันตัวลอกรหัสแต่ละตัวสามารถใช้ค่าความควรจะเป็นที่ได้จากตัวลอกรหัสอื่นเข้าช่วยในการตีความจนได้ข้อสรุปค่าที่ควรจะเป็นมากที่สุด

กฎเกณฑ์ :

IF (ถ้า) <เงื่อนไข> THEN (แล้ว) <ผลที่ตามมา>

การใช้เหตุผลการตัดสินใจ หรือการตอบสนองต่อเหตุการณ์ต่าง ๆ ของมนุษย์นั้นโดยปกติจะมีลักษณะที่คลุมเครือ เช่น การประเมินสถานะการณ์ หรือการระบุการตอบสนองโดยไม่ได้ระบุเป็นค่าที่แน่นอนชัดเจน ดังนั้นจึงถูกจำลองไว้ในกฎเกณฑ์ด้วยเซตวิภันย์ ตัวอย่างเช่น ระบบควบคุมอุณหภูมิโดยใช้พัดลม อาจมีกฎเกณฑ์ดังนี้:

IF อุณหภูมิเย็นมาก THEN หยุดพัดลม

IF อุณหภูมิเย็น THEN ปรับพัดลมให้ช้าลง

IF อุณหภูมิปานกลาง THEN รักษาระดับความเร็ว

IF อุณหภูมิร้อน THEN ปรับพัดลมให้เร็วขึ้น

สังเกตว่าไม่มีการใช้ ELSE (ไม่เช่นนั้น) ทุกเงื่อนไขจะต้องถูกนำมาพิจารณาเนื่องมาจากสภาพกำลังในตรรกศาสตร์คลุมเครือ เช่น อุณหภูมิอาจเป็นสมาชิกของทั้งเซต "เย็น" และ "ปานกลาง" โดยอาจมีค่าระดับความเป็นสมาชิกของแต่ละเซตต่างกันซึ่งชุดของกฎเกณฑ์ดังกล่าวนี้เรียกว่า กฎเกณฑ์ฟัซซี่ (fuzzy rule) ฐานกฎเกณฑ์ฟัซซี่ (fuzzy rule base) หรือ ฐานความรู้ (knowledge base)

การดำเนินการทางตรรกะ เช่น AND (และ) OR (หรือ) NOT (ไม่) นั้นก็มีใช้สำหรับตรรกศาสตร์คลุมเครือสำหรับการสร้างเงื่อนไขของเหตุการณ์ที่ซับซ้อน เช่นเดียวกับตรรกศาสตร์แบบฉบับ โดยปกติแล้วจะนิยาม  $AND = \text{minimum}$   $OR = \text{maximum}$  และ  $NOT = \text{complement}$  ซึ่งการนิยามตามแบบนี้เรียกว่า ตัวดำเนินการซาเดห์ (Zadeh operator) เนื่องจากเป็นไปตามลักษณะนิยามที่ ซาเดห์ใช้ในบทความดั้งเดิมของเขา

ดังนั้นหากเรามีตัวแปรฟัซซี่  $x$  และ  $y$  :

$$NOT\ x = (1 - \text{truth}(x))$$

$$x\ AND\ y = \text{minimum}(\text{truth}(x), \text{truth}(y))$$

$$x\ OR\ y = \text{maximum}(\text{truth}(x), \text{truth}(y))$$

นอกจากนี้แล้วก็ยังมีตัวดำเนินการอื่นที่สื่อความหมายในเชิงภาษาพูด เรียกในภาษาอังกฤษว่า hedges หรือ linguistic hedges (หมายถึง คำที่ทำให้คลุมเครือ) เช่น "มาก" "บ้าง" ซึ่งใช้ในการแปลงความหมายของเซตโดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ ในทางปฏิบัติ การนำกฎเกณฑ์ความชำนาญนี้มาใช้งาน มักจะเกี่ยวข้องกับค่าที่แน่นอน เช่น ค่าที่ได้จากการวัด และค่าที่ส่งออกเพื่อใช้งานก็มักจะเป็นค่าที่แน่นอนเช่นเดียวกันส่วนที่ทำการแปลงค่ารับเข้าที่เป็นค่าแน่นอนนี้ ไปสู่เซตคั่นด้วยฟังก์ชันภาวะสมาชิก เรียกว่าตัวทำให้คลุมเครือ (fuzzifier) และส่วนที่ทำการส่งค่าผลลัพธ์จากเงื่อนไขไปสู่ค่าแน่นอนเพื่อส่งออกไปใช้งานจริง เรียกตัวกำจัดความคลุมเครือ (defuzzifier) นอกจากนั้นแล้วในการสร้างกฎเกณฑ์ฟัซซี่ที่มีตัวแปรค่ารับเข้าเป็นจำนวนมากให้ครอบคลุมทุกเงื่อนไขนั้นเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติบางครั้งจึงต้องมีการผสมเงื่อนไขหลายเงื่อนไขในกฎเกณฑ์ฟัซซี่เข้าด้วยกันโดยมีส่วนตีความผลลัพธ์ร่วมจากการผสมเงื่อนไข เรียก เครื่องอนุมานฟัซซี่ (fuzzy inference engine) ซึ่งมีหลายชนิดด้วยกัน

ขั้นแรกของการควบคุมแบบฟัซซี่ก็คือขั้นตอนที่เรียกว่า fuzzification ซึ่งในขั้นตอนนี้ทำหน้าที่แปลงข้อมูลที่รับเข้ามาจากระบบควบคุมให้เป็นอินพุตของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ คือมีความหมายเดียวกับระบบฟัซซี่ ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของค่าความเป็นสมาชิก (grade of



membership) ในรูปของฟัซซี่เซต ขั้นตอนนี้ก็คล้าย ๆ กับตัวอย่างก่อนหน้านี้ เช่น น้ำร้อนน้อย คิดเป็น 40% และน้ำร้อนมากคิดเป็น 60%

ขั้นตอนต่อไปก็คือการหาความและวิเคราะห์อินพุตตามเงื่อนไขที่ได้มีการกำหนดไว้หรือเข้ากฎพื้นฐานของฟัซซี่ (knowledge base) แล้วจะได้ผลลัพธ์ออกมา เช่นการหาว่าถ้า น้ำร้อนน้อยคิดเป็น 100% ก็จะปรับลูกบิดเพื่อให้เย็นขึ้นเล็กน้อย (“a little bit” cooler) แต่ถ้า น้ำร้อนมากคิดเป็น 100% ก็จะปรับลูกบิดเพื่อให้เย็นขึ้นมาก ๆ (“a lot” cooler) โดยที่คำว่า “a little bit” และ “a lot” เป็นส่วนหนึ่งที่มีการนิยามเอาไว้ในส่วนของกฎพื้นฐานของฟัซซี่ ขั้นตอนถัดไปเป็นขั้นตอนที่เรียกว่า “defuzzify” โดยผลของการเข้ากฎพื้นฐานฟัซซี่จะถูกแปลงกลับไปเป็นค่าเอาต์พุตจริง ผลลัพธ์ทั้งหมดที่ได้จะถูกประมวลเข้าด้วยกัน ยกตัวอย่าง เช่น เราจะคำนวณว่าค่าที่บอกว่าเล็กน้อย 40% (40% of a little bit) หรือจำนวนมาก 60% (60% of a lot) หมายความว่าอย่างไรผลที่ได้จะเป็นเอาต์พุต ในการอธิบายให้เห็นรูปในเชิงปริมาณมากกว่านี้จำเป็นต้องอธิบายไปถึงเรื่องของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) การนอร์มัลไลซ์อินพุต และการทำฟัซซี่ฟิเคชัน(defuzzification) ของสัญญาณ ตัวอย่างของการใช้ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ในที่นี้ยกตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ inverted pendulum balancer ซึ่งเป็นกลไกที่คอยทำให้ด้ามของวัตถุสมดุลอยู่เสมอโดยการเคลื่อนที่ เฉพาะที่ฐานของมันซึ่งต่ออยู่กับสายพานและมอเตอร์ มุมของด้ามของวัตถุจะใช้โพเทนชิโอ มิเตอร์(potentiometer) หรือใช้ optical encoder disk โดยที่เราจะต้องเก็บข้อมูลของมุมของ ค่ากระแสและค่าผลต่างเชิงมุมเทียบกับเวลาและใช้ข้อมูลดังกล่าวในการกำหนดว่าจะต้องจ่าย กระแสให้กับมอเตอร์มากน้อยแค่ไหน และจ่ายในทิศทางใด เมื่อเรานำข้อมูล 2 ตัวนี้มารวมกัน ก็จะทำให้เราได้ฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกทั้งหมด 7 ฟังก์ชันได้แก่ Negative\_Large, Negative\_Medium, Negative\_Small, Zero, Positive\_Small, Positive\_Medium, และ Positive\_Large

ค่าอนาล็อกหนึ่งสามารถจัดเป็น 2 สถานะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นสมาชิก ยกตัวอย่างเช่น ถ้ามีมุมอยู่ในช่วง  $-12^{\circ}$  ถึง  $12^{\circ}$  ก็จะอยู่ในสถานะศูนย์ (“Zero” state) และถ้ามีมุม  $0^{\circ}$  ถึง  $36^{\circ}$  ก็จะอยู่ในสถานะบวกเล็กน้อย (“Positive\_Small”) ดังนั้นมุม  $10^{\circ}$  ก็จะมีสถานะทั้งสองสถานะข้างต้น

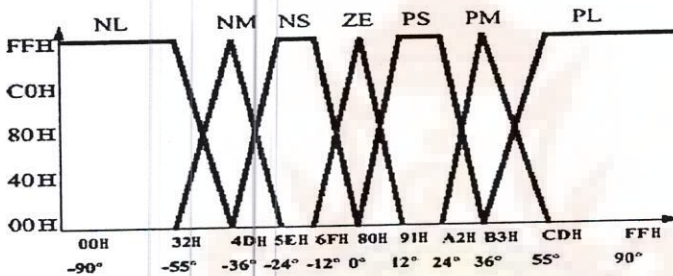
$$x_{normalized} = \frac{(2^n - 1)(x_{analog} - offset)}{spen} \quad (2-27)$$

ก่อนที่จะทำการตีความค่าอนาล็อกในตารางฟังก์ชันความเป็นสมาชิกต้องทำการนอร์มัลไลซ์โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$x_{normalized} = \frac{255(x_{analog} + 90^\circ)}{180^\circ} \tag{2-28}$$

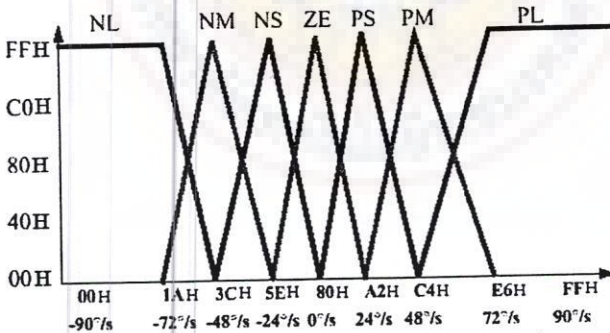
สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ 8 บิต อย่างไมโครคอนโทรลเลอร์ 8051 จะมีค่า n=8 และสำหรับเรื่องของมุมจะมีค่าของออฟเซตเท่ากับ -90° และค่าของ span เท่ากับ 90° ดังนั้นสมการจะสามารถลดรูปเป็น

$$x_{normalized} = \frac{255(x_{analog} + 18mA)}{36mA} \tag{2-29}$$



รูปที่ 2-15 ฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกหรือความสัมพันธ์ของสมาชิก

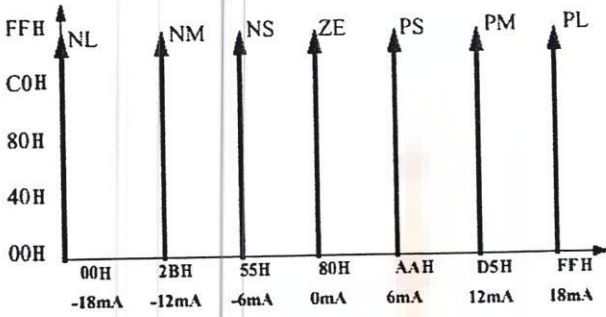
ฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกหรือความสัมพันธ์ของสมาชิก (Membership functions) สามารถนิยามโดยใช้รูปหรือกราฟ และระบุเป็นตัวเลขฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของมุมแสดงไว้ดังรูปข้างล่าง



รูปที่ 2-16 ฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกหรือความสัมพันธ์ของสมาชิก



ส่วนฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกของผลต่างเชิงมุมเทียบกับเวลา (angle derivative) แสดงไว้ดังรูปถัดไป



รูปที่ 2-17 ฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกของผลต่างเชิงมุมเทียบกับเวลา

ส่วนฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตมีลักษณะเป็นแบบ “singletons”

$$\text{slope} = \frac{255}{X2 - X1} \tag{2-30}$$

ในการกำหนดค่าใด ๆ มีความเป็นสมาชิกของฟังก์ชันทั้งสองที่ใกล้เคียงกันมากน้อยแค่ไหนนั้นจำเป็นต้องคำนวณความชันของด้านต่าง ๆ ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership functions) ซึ่งคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

ตารางที่ 2-1 ตารางฟัซซี่ลอจิก

Angle	Delta_Angle						
	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PL	PL	PM	PS	ZE
NM	PL	PL	PL	PM	PS	ZE	NS
NS	PL	PL	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
PS	PM	PS	ZE	NS	NM	NL	NL
PM	PS	ZE	NS	NM	NL	NL	NL
PL	ZE	NS	NM	NL	NL	NL	NL

เมื่อเราทราบค่าความชันแล้วเราจะสามารถคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิก (membership function grade) ได้ตั้งเงื่อนไขข้างล่างนี้คือ

If Point1<Input<Point2:

Grade=(Input-Point1)(Slope1)

If Input>Point2:

Grade=FFH-((Input-Point2)(Slope2))

โจทย์ปัญหา ถ้ามุมมีค่า  $10^\circ$  และผลต่างเชิงมุมเทียบกับเวลามีค่าเท่ากับ  $-10^\circ$  /s ให้ทำการคำนวณหาค่าความเป็นสมาชิก

จากนั้นเราต้องทำการตีความและค้นหาผลลัพธ์จากกฎเกณฑ์พื้นฐานที่มีอยู่ เช่น กฎหนึ่งระบุว่าถ้ามุมมีค่าเป็นลบเล็กน้อย (Negative\_Small) และผลต่างเชิงมุมเทียบกับเวลา (Delta\_Angle) เป็นศูนย์ (Zero) แล้วกระแสของมอเตอร์จะมีค่าเป็นบวกเล็กน้อย (Positive\_Small)

ตารางสรุปกฎเกณฑ์ต่าง ๆ ของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ที่จะใช้ในตัวอย่างต่อไป แสดงไว้ในตารางข้างล่างนี้

$$Output = \frac{\sum_{i=1}^n F_i S_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (2-31)$$

ตัวอย่างเช่น ถ้ามุมเป็นศูนย์และผลต่างของมุมมีค่าลบเล็กน้อย (negative\_small) แล้วจะได้ผลลัพธ์เป็นบวกเล็กน้อย (positive small)

สำหรับกฎเกณฑ์ที่มีเงื่อนไขความต้องการ 2 อย่างด้วยกันนั้นเราจะกำหนดค่าความเป็นสมาชิกจากค่าต่ำสุดระหว่างค่าความเป็นสมาชิกของแต่ละเงื่อนไข ยกตัวอย่างเช่น ค่าความเป็นสมาชิกของเงื่อนไขที่ระบุว่ามุมมีค่าเป็นศูนย์มีค่าเท่ากับ 2AH ส่วนค่าความเป็นสมาชิกของเงื่อนไขที่ระบุว่าผลต่างเชิงมุมเทียบกับเวลามีค่าเป็นลบเล็กน้อย นั้นมีค่าเท่ากับ 6AH ดังนั้นเราจะใช้ค่าที่ต่ำที่สุดก็คือ 2AH ดังนั้นค่าเอาต์พุตจะมีค่าความเป็นสมาชิกในสถานะบวกเล็กน้อยเท่ากับ 2AH

ถ้ามีกฎมากกว่า 2 กฎ ที่ระบุไปยังสถานะเดียวกันวิธีพิจารณาก็คือจะใช้ค่าความเป็นสมาชิกสูงสุดของกฎเหล่านั้นและค่าความเป็นสมาชิกที่ได้จะเป็นค่าความเป็นสมาชิกของสถานะเอาต์พุต เช่นเราจำเป็นต้องพิจารณากฎเกณฑ์ 4 กฎ สำหรับอินพุต 2 อินพุต โดยที่กฎเกณฑ์ทั้ง 4 กฎมีดังนี้

Angle=ZE & DAngle=ZE: Grade=Min(2AH, 95H)=2AH in ZE

Angle=ZE & DAngle=NS: Grade=Min(2AH, 6AH)=2AH in PS

Angle=PS & DAngle=ZE: Grade=Min(D5H, 95H)=95H in NS

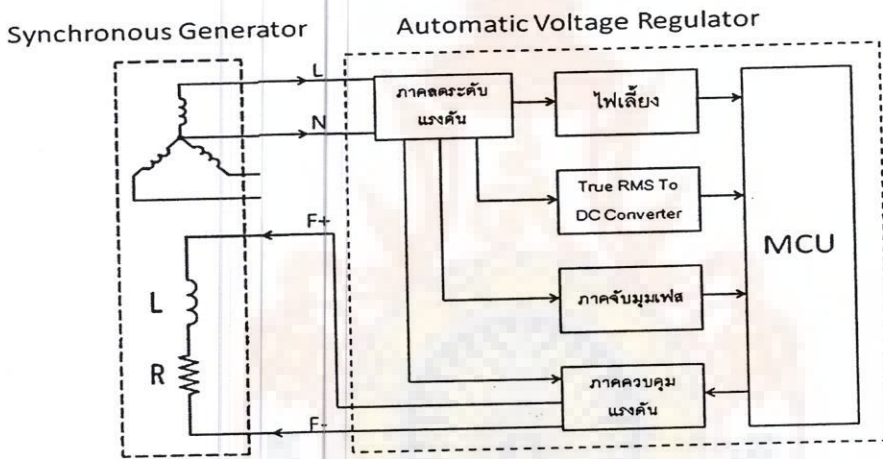
Angle=PS & DAngle=NS: Grade=Min(D5H, 6AH)=6AH in ZE

สังเกตว่าทั้งสองกรณีระบุไปที่สถานะเดียวกันก็คือ ZE ดังนั้นเราจะเลือกใช้ค่าความเป็นสมาชิกที่สูงที่สุดก็จะได้ค่าความเป็นสมาชิกของเอาต์พุตของสถานะ ZE เท่ากับ 6AH ค่าความเป็นสมาชิกในสถานะ PS มีค่าเป็น 2AH และค่าความเป็นสมาชิกในสถานะ NS มีค่าเป็น 95H

### บทที่ 3

#### การออกแบบและพัฒนาโปรแกรม

ระบบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส 3 เฟส ประกอบด้วยขดลวดสร้างแรงดันไฟฟ้าและขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก โดยขนาดของแรงดันจะแปรผันตามความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในระบบจะนำเอาแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามา 1 เฟสเพื่อจ่ายย้อนกลับไปให้ขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่เป็นพีซีซีลอจิก โดยมีลักษณะระบบการทำงานดัง รูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 แสดงบล็อกการทำงานของระบบควบคุม

### 3.1 การออกแบบระบบฮาร์ดแวร์

#### 3.1.1 วงจรวัดระดับแรงดัน

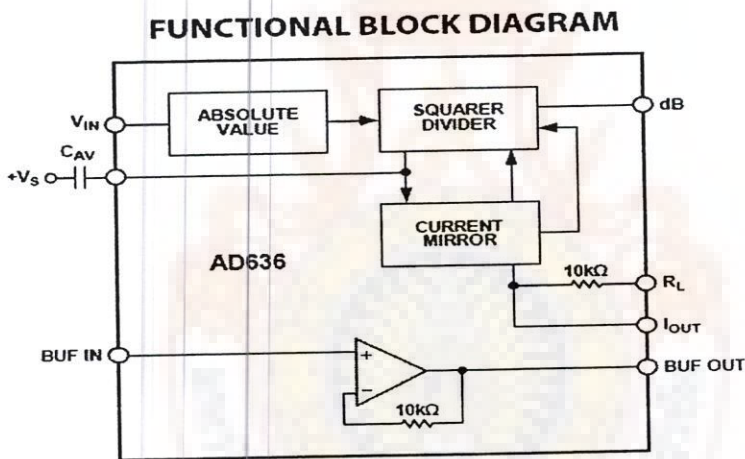
วงจรวัดระดับแรงดันเป็นวงจรที่ใช้สำหรับวัดแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยจะวัดแรงดันไฟฟ้าต่อเฟส ซึ่งจะทำให้ทราบระดับแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าหรือต่ำกว่าระดับที่ต้องการ ซึ่งจะใช้ ไอซี เบอร์ AD636 เป็นตัวแปลงจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อป้อนให้แก่ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้ในการประมวลต่อไป



ไอซี เบอร์ AD636 สร้างโดยบริษัท ANALOG DEVICES ซึ่งคุณสมบัติเบื้องต้นของ ไอซี เบอร์ AD636 มีดังนี้

- เป็นตัวแปลงจาก True RMS เป็น DC
- รับค่าสูงสุดได้ที่ 200 มิลลิโวลต์
- มีความแม่นยำสูง (ค่าผิดพลาดสูงสุดที่ 1.0%)
- มีผลการตอบสนองที่ช่วงกว้าง (1 MHz, 3dB bandwidth:  $V_{rms} > 100 \text{ mV}$ )
- ใช้พลังงานต่ำ ที่ 800 ไมโครแอมป์

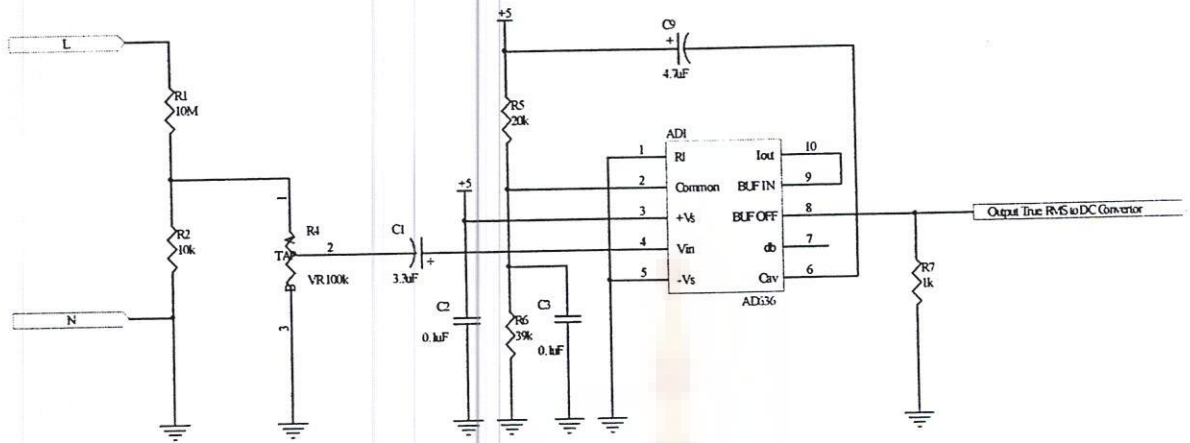
AD636 จะคำนวณค่า True root-mean-square ของสัญญาณอินพุตที่เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ และให้เอาต์พุตที่เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เทียบเท่าในรูปแบบของไฟฟ้ากระแสตรง เป็นค่า True RMS ซึ่งมีบล็อกไดอะแกรมการทำงานดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของ AD636

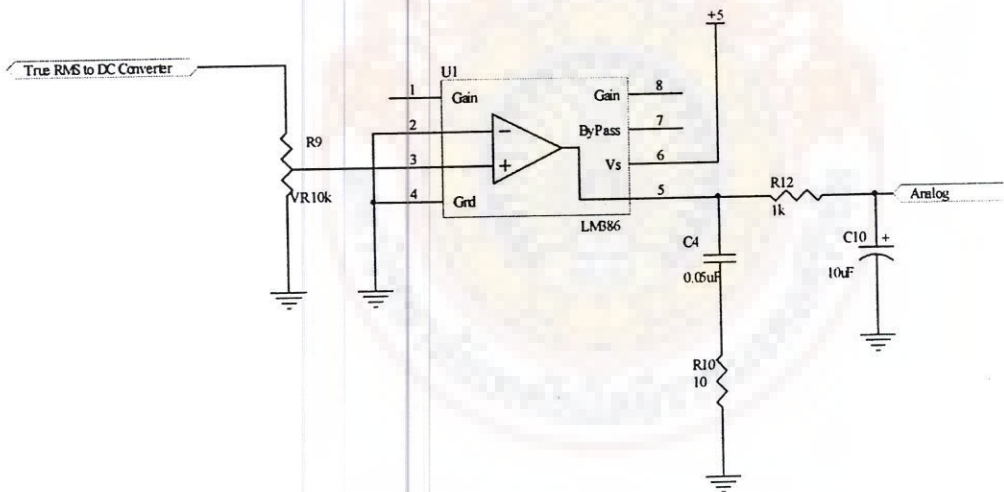
วงจรระดับแรงดัน ในส่วนแรกจะใช้วงจรแบ่งแรงดันเพื่อลดระดับแรงดันจากอินพุต สูงสุด 300 โวลต์ ให้เหลือไม่เกิน 0.2 โวลต์ โดยใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานขนาด 10 เมกะโห์ม และ 10 กิโลโห์ม มาอนุกรมกัน เมื่อได้ระดับแรงดันตามที่ต้องการแล้วจะนำมาผ่านวงจร True RMS to DC Converter โดยใช้ ไอซี เบอร์ AD636JH 2 ดังวงจรในรูปที่ 3-3





รูปที่ 3-3 วงจรวัดระดับแรงดัน

เนื่องจากสัญญาณที่ออกมาจาก วงจร True RMS to DC Converter จะอยู่ที่ 0 – 0.2 โวลต์ดีซี (VDC) ดังนั้น ก่อนที่จะนำสัญญาณป้อนแก่ระบบแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลของ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องทำการขยายก่อน ด้วย อปป์แอมป์ให้ได้ 0-5 โวลต์โดยเลือกใช้อปป์แอมป์เบอร์ LM386 เพื่อขยายให้ได้แรงดันที่ต้องการ ดังแสดงวงจรในรูปที่ 3-4

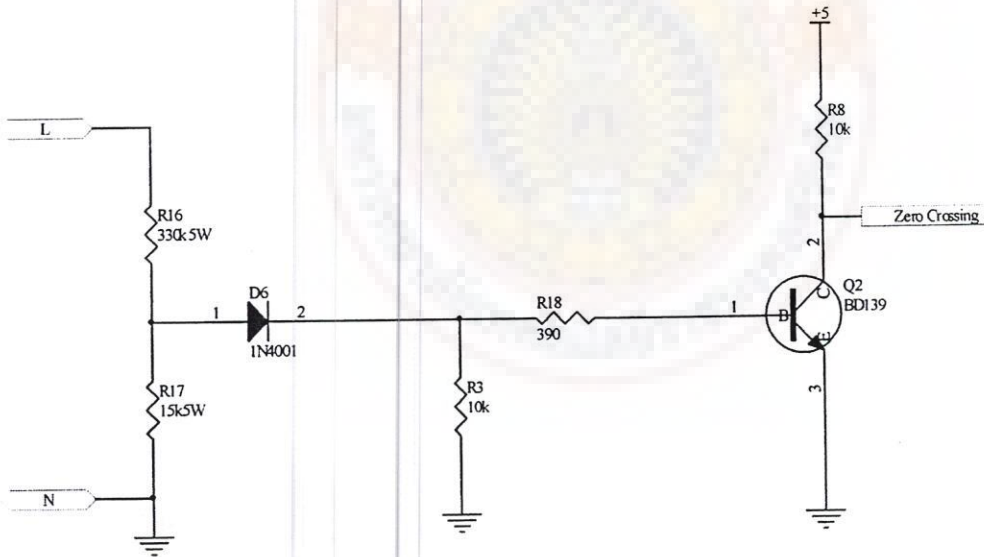


รูปที่ 3-4 วงจรขยายแรงดัน

### 3.1.2 วงจรวัดมุมเฟส

เหตุผลที่ต้องใช้วงจรวัดมุมเฟสเพราะส่วนของตัวควบคุมแรงดันนี้ได้ใช้ เอสซีอาร์ เป็นตัวควบคุมแรงดัน และวิธีการควบคุมแรงดันของ เอสซีอาร์ ก็คือการจุดชนวนเกตของ เอสซีอาร์ ในมุมต่าง ๆ ก่อนที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสามารถรู้ว่าตอนนี้มุมเฟสอยู่มุมไหนจึงจำเป็นต้องหา วงจรที่ส่งสัญญาณว่าขณะนี้มุมเฟสของแรงดันอยู่ที่ ศูนย์องศาหรือไม่ให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ทุก ๆ ศูนย์องศา เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถคำนวณเวลาในการจุดชนวนให้กับ เอสซีอาร์ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

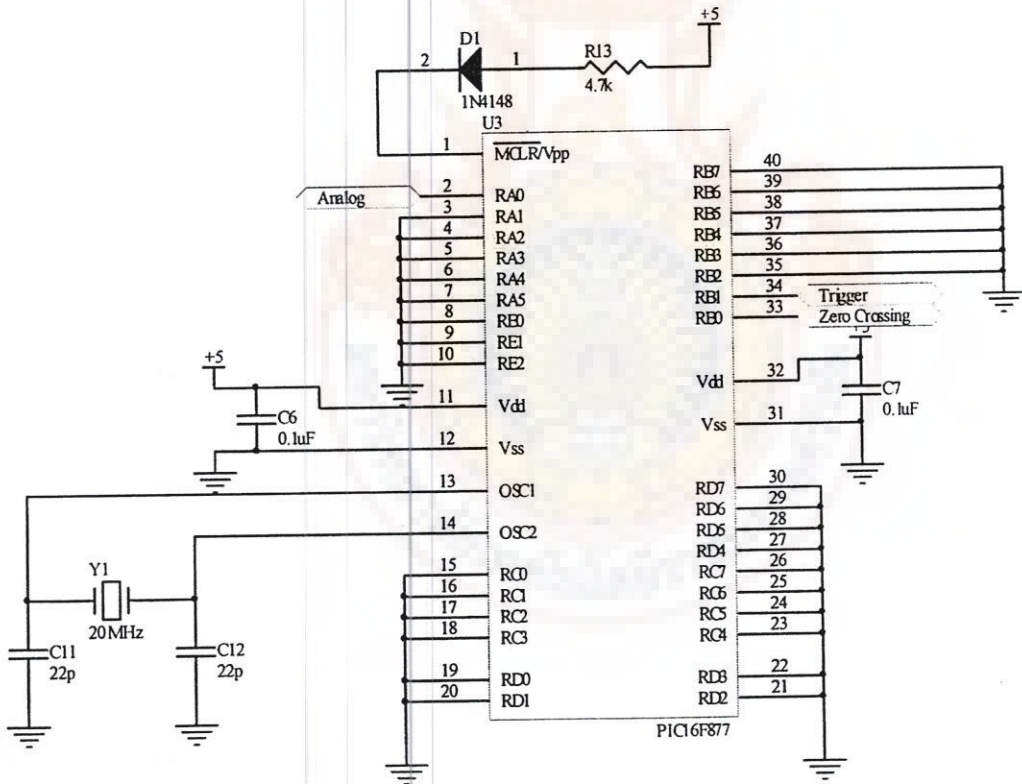
การออกแบบวงจรวัดมุมเฟส ในส่วนแรกจะใช้วงจรแบ่งแรงดันเพื่อลดระดับแรงดัน จากอินพุต 300 โวลต์ ให้เหลือไม่เกิน 12 โวลต์ โดยใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานขนาด 330 กิโลโอห์ม และ 15 กิโลโอห์ม มาอนุกรมกัน เมื่อได้ระดับแรงดันตามที่ต้องการแล้วจะส่งสัญญาณ ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นทางด้านบวก หลังจากนั้นก็นำสัญญาณที่ได้ไป ไบอัส ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BD139 เมื่อทรานซิสเตอร์ถูก ไบอัส ทรานซิสเตอร์จะเป็นเหมือนสวิตช์เปิด ทำให้สัญญาณออกมาเป็นลักษณะพัลส์สี่เหลี่ยมที่ความถี่ 50 Hz เมื่อได้สัญญาณเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมแล้ว จึงส่งสัญญาณเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงมุม ศูนย์องศา ดังวงจรในรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 วงจรวัดมุมเฟส

### 3.1.3 วงจรประมวลผล

ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC16F877A เป็นตัวประมวลผลแบบพีซีซีลอจิก ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A เป็นของบริษัทไมโครชิพ มีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 20 MHz เฟลตโปรแกรมนอยู่ที่  $8k \times 14$  word มีแรม  $368 \times 8$  byte มีอีอีพรอม  $256 \times 8$  byte มีระบบแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลในตัว จึงมีความเหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ นอกจากนี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A เป็นเบอร์ยอดนิยมสำหรับประเทศไทย ทำให้อุปกรณ์รองรับสำหรับเบอร์นี้จึงมีมากมายทำให้มีความสะดวกสำหรับการพัฒนา โดยในระบบที่ออกแบบนี้จะใช้คริสตัลความถี่ 20 MHz และกำหนดให้ขา RA0 ซึ่งเป็นขารับสัญญาณอนาล็อกทำหน้าที่รับสัญญาณระดับแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กำหนดให้ขา RB0 ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจเช็คมุมศูนย์ของสัญญาณไซน์ และกำหนดให้ขา RB1 ทำหน้าที่ในการทริกสัญญาณควบคุมแก๊สฮีอาร์คังวงจรในรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 วงจรประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์



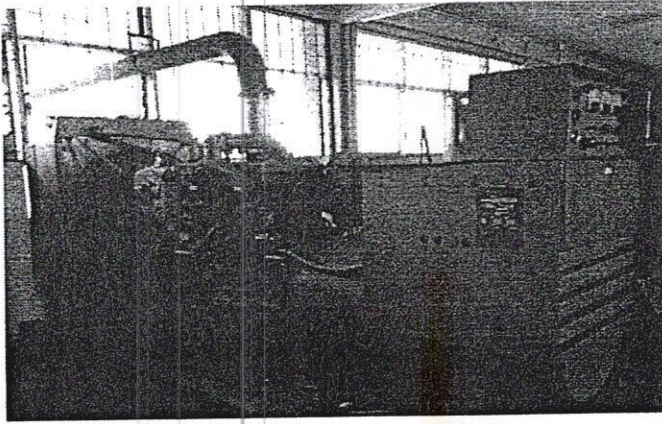
3.1.4 วงจรควบคุมกระแสฟีดลอคอยล์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในการทำโครงการนี้มีชื่อ CATERPILLAR โมเดล SR-4 มีความเร็ว 1500 รอบต่อนาที มีความถี่ 50 เฮิรตซ์ มีพิกัด 155 กิโลวัตต์ มีพิกัดเอ็กไซเตอร์ฟีดลอคอยล์ 22.5 โวลต์ 8 แอมป์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ เอสซีอาร์ เบอร์ S6025L ซึ่งสามารถทนกระแสได้ 25 แอมป์ และสามารถทนกับแรงดันไม่เกิน 600 โวลต์ และมีไฟลวิตไดโอด ซึ่งเลือกใช้เบอร์ RHRG30120 ที่เป็นไดโอดชนิด ไฮเปอร์ฟาส ไดโอด ที่มีความไวน้อยกว่า 65 ไมโครวินาที และสามารถทนกระแสได้ 30 แอมป์ และทนแรงดันได้ 1200 โวลต์ เนื่องจากการจ่ายพลังงานให้เอ็กไซเตอร์มากเท่าไร เอ็กไซเตอร์ก็ยิ่งสิ้นพลังงานมาสูงมากเท่านั้น เพื่อความปลอดภัยของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตัวอื่น ๆ ในวงจรดังนั้นไดโอดนี้จำเป็นต้องสิ้นพลังงานให้หมดและไวที่สุดเท่าที่จะทำได้

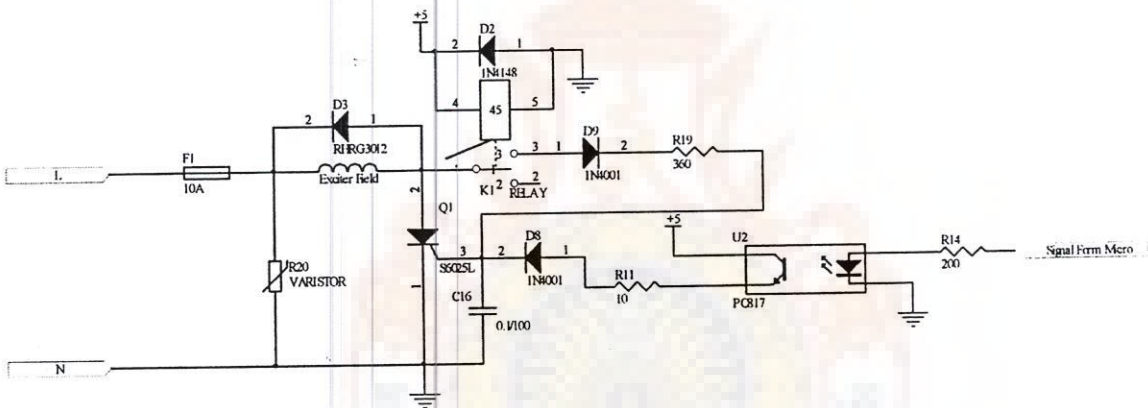
TYPE	Part Number						I <sub>T</sub>		V <sub>DRM</sub> & V <sub>RRM</sub>	I <sub>GT</sub>	I <sub>DRM</sub> & I <sub>RRM</sub>			
	Isolated			Non-isolated			(1) (15)		Volts	mAmps	mAmps			
	TO-220	TO-218X	TO-218	TO-220	TO-218X	TO-218	I <sub>T(RMS)</sub>	I <sub>T(AV)</sub>			T <sub>c</sub> = 25 °C	T <sub>c</sub> = 100 °C	T <sub>c</sub> = 125 °C	
							TO-263 D <sup>2</sup> Pak							
	See "Package Dimensions" section for variations. (11)						MAX		MIN	MIN	MAX	MAX		
25 A	S2025L			S2025R			25	16	200	1	35	0.01	1	2
	S4025L			S4025R			25	16	400	1	35	0.01	1	2
	S6025L			S6025R			25	16	600	1	35	0.01	1	2
	S8025L			S8025R			25	16	800	1	35	0.02	1.5	3
	SK025L			SK025R			25	16	1000	1	35	0.02	3	

รูปที่ 3-7 แสดงข้อมูลคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเอสซีอาร์ เบอร์ S6025L

การควบคุมกระแสฟีดลอคอยล์จะใช้วงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงครึ่งคลื่นเฟสเดียว (single phase half wave converters) ซึ่งเป็นการควบคุมคลื่นด้านบวกของรูปคลื่นซึ่งมีผลให้แรงดันด้านเอาต์พุตของเอสซีอาร์ แปรผันตามมุมทริกของเอสซีอาร์ ที่ถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังในรูปที่ 3-9 โดยจะใช้ ตัวต้านทาน ที่มีค่าความต้านทานขนาด 360 โอห์มต่อกับไดโอด เบอร์ 1N4007 เพื่อที่จะควบคุมเฉพาะครึ่งบวกเท่านั้น เนื่องจากช่วงเริ่มสตาร์ท เครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะมีแรงดันอยู่ที่ประมาณ 10 V เนื่องจากยังมีสนามแม่เหล็กตกค้างอยู่เล็กน้อย เมื่อวงจรจุดชนวนแบบอัตโนมัติ เพิ่มแรงดันขึ้นมาได้จนกระทั่งไฟเลี้ยงมีระดับแรงดันที่สามารถเลี้ยงไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ รีเลย์จะทำหน้าที่ตัดวงจรจุดชนวนแบบอัตโนมัติและจะให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมมุมจุดชนวนของ เอสซีอาร์แทน

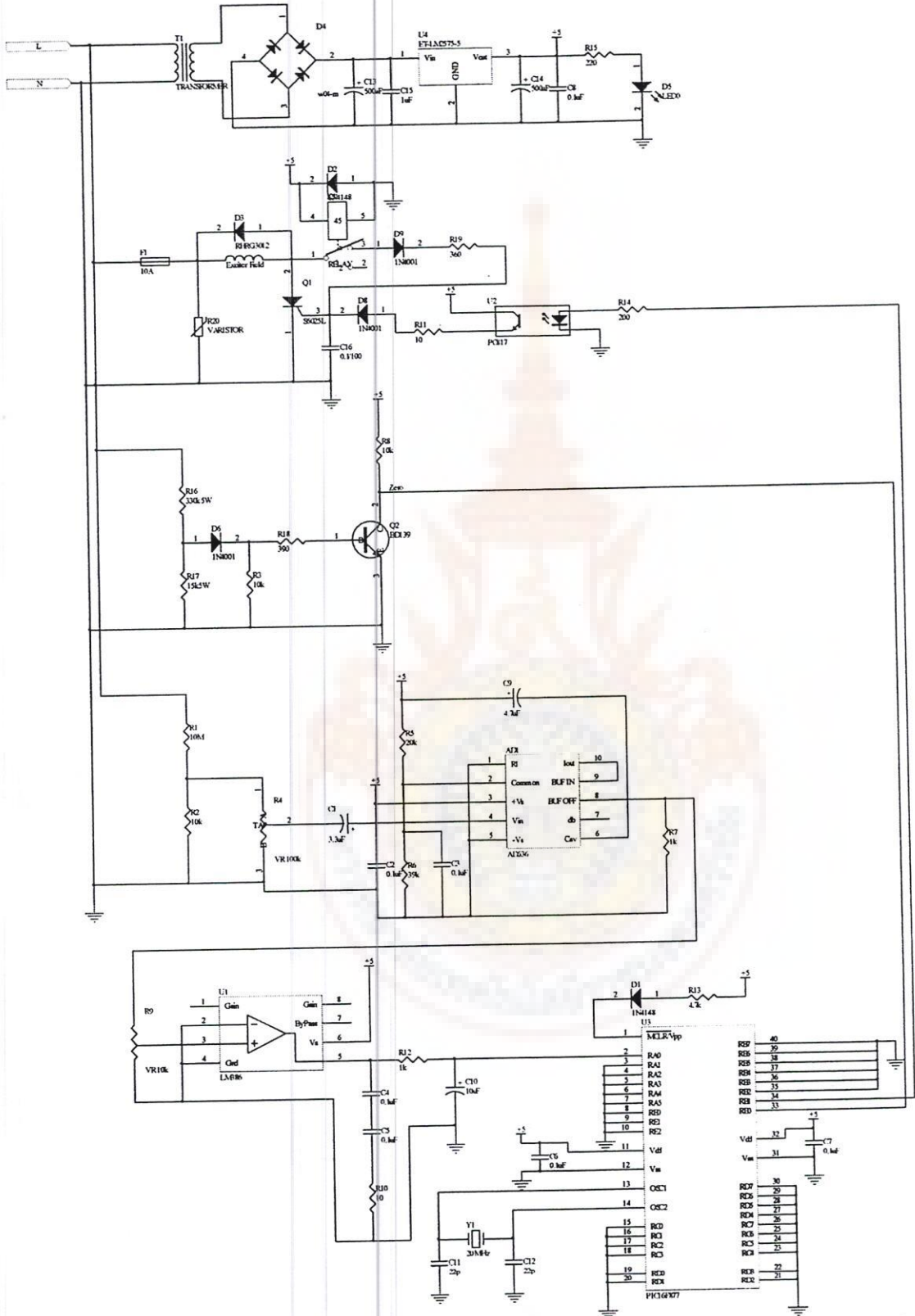


รูปที่ 3-8 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดซิงโครนัส ขนาด 155kW

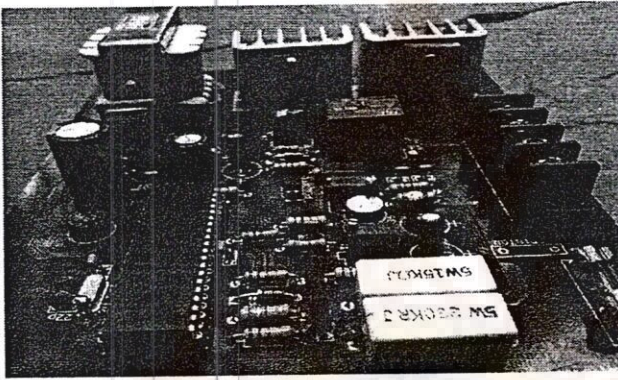
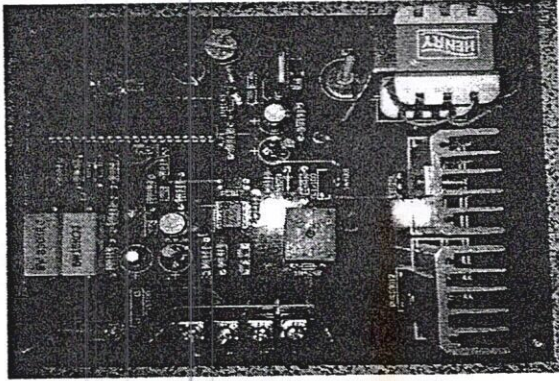


รูปที่ 3-9 วงจรควบคุมกระแสฟีดคอยล์





รูปที่ 3-10 วงจรเครื่องควบคุมแรงดันไฟฟ้า

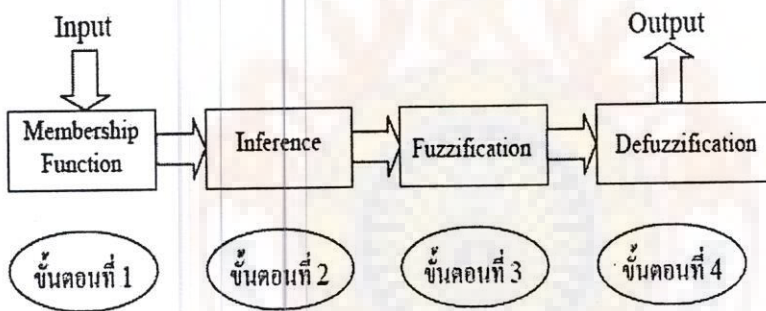


รูปที่ 3-11 บอร์ดเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยฟิซซีลอจิกสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสที่ลงอุปกรณ์

### 3.2 การออกแบบซอฟต์แวร์

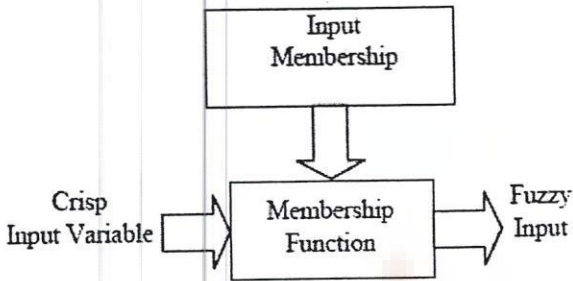
ในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบควบคุมที่เรียกว่า ฟัซซี่ลอจิกคอนโทรล ซึ่งเป็นศาสตร์ด้านการคำนวณที่เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในวงการวิจัยด้านคอมพิวเตอร์ และได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ มากมาย เช่น ด้านการแพทย์ ด้านการทหาร ด้านธุรกิจ ด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น

ฟัซซี่ลอจิกมีข้อดีในเรื่องการมีเหตุผลเชิงตรรกะ โครงสร้างของระบบฟัซซี่ที่สามารถเข้าใจได้ เนื่องจากสามารถตีความได้ในรูป If-Then ซึ่งสอดคล้องกับตรรกะความคิดของมนุษย์ และนอกจากนั้นฟัซซี่ลอจิกยังช่วยในการตัดสินใจที่คลุมเครือที่ขอมให้การตัดสินใจเป็นแบบส่วน ไม่ใช่ผิดหรือถูกเพียงสองสถานะ แต่จะเป็นดีกรีของความถูกหรือผิด ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติอยู่แล้ว สำหรับข้อเสียของระบบฟัซซี่ก็คือ ไม่มีกระบวนการเรียนรู้ในการปรับแต่งโครงสร้างซึ่งกฎและตัวแปรต่าง ๆ ในตัวระบบเอง โครงสร้างของระบบจะถูกกำหนดโดยผู้เชี่ยวชาญในโดเมนที่กำลังพิจารณาพร้อมกับนักเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ การที่ระบบฟัซซี่ไม่มีกระบวนการเรียนรู้ด้วยตนเองจึงถือเป็นข้อด้อย ขั้นตอนการประมวลผลแบบฟัซซี่ลอจิกมีรูปแบบการทำงานเป็น 4 ส่วนดังนี้



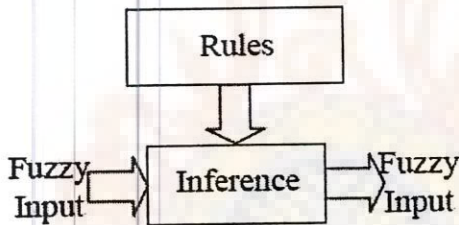
รูปที่ 3-11 ภาพขั้นตอนการประมวลผลของฟัซซี่ลอจิกโดยรวม

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการแปลงการอินพุตแบบทวินัยเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัซซี่ โดยจะสร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก โดยไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเดียวกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะของแต่ละอินพุต และความสำคัญต่อเอาต์พุต ที่น่าสนใจโดยฟังก์ชันจะมีลักษณะเป็นการกำหนดภาษามัธย เพื่อให้เป็นฟัซซี่การอินพุตดังรูป



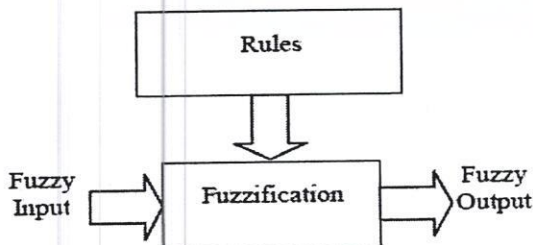
รูปที่ 3-12 ขั้นตอนการประมวลผลของฟัซซี่ลอจิกขั้นตอนที่ 1

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการอินพุตทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตที่อาศัยหลักการหาเหตุและผล อาจจะสร้างการเก็บข้อมูล การคาดการณ์จากการตัดสินใจของมนุษย์ หรือค่าจากการทดลอง โดยเขียนกฎเป็นการควบคุมระบบ ซึ่งมีลักษณะอยู่ในรูปแบบ ถ้า (If) และ (And) หรือ (Or) ซึ่งเป็นภาษาสามัญ นำกฎทั้งหมดมาประมวลผลรวมกัน เพื่อการตัดสินใจที่เหมาะสม ดังรูป



รูปที่ 3-13 ขั้นตอนการประมวลผลของฟัซซี่ลอจิกขั้นตอนที่ 2

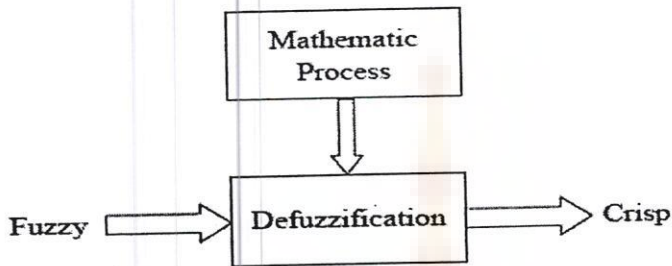
ขั้นตอนที่ 3 เป็นการหาฟัซซี่เอาต์พุต โดยการนำกฎการควบคุมที่สร้างขึ้นจากขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับฟัซซี่อินพุต โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำค่าที่ได้ประมวลผล ดังภาพ



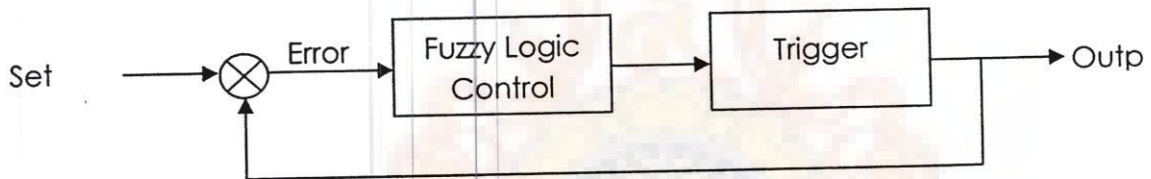
รูปที่ 3-14 ขั้นตอนการประมวลผลของฟัซซี่ลอจิกขั้นตอนที่ 3



ขั้นตอนที่ 4 เป็นขั้นตอนสุดท้ายหรือขั้นตอนการสรุปเหตุผลฟัซซี่ โดยจะเปลี่ยนฟัซซี่ เอادتฟุตให้เป็นทวินัยเอادتฟุตตามภาพ และด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ เช่น วิธีการหาจุดศูนย์กลางถ่วง (Central of Gravity) เพื่อนำค่าที่ได้มาใช้ในการตัดสินใจเพื่อควบคุมระบบในสถานการณ์นั้นๆ

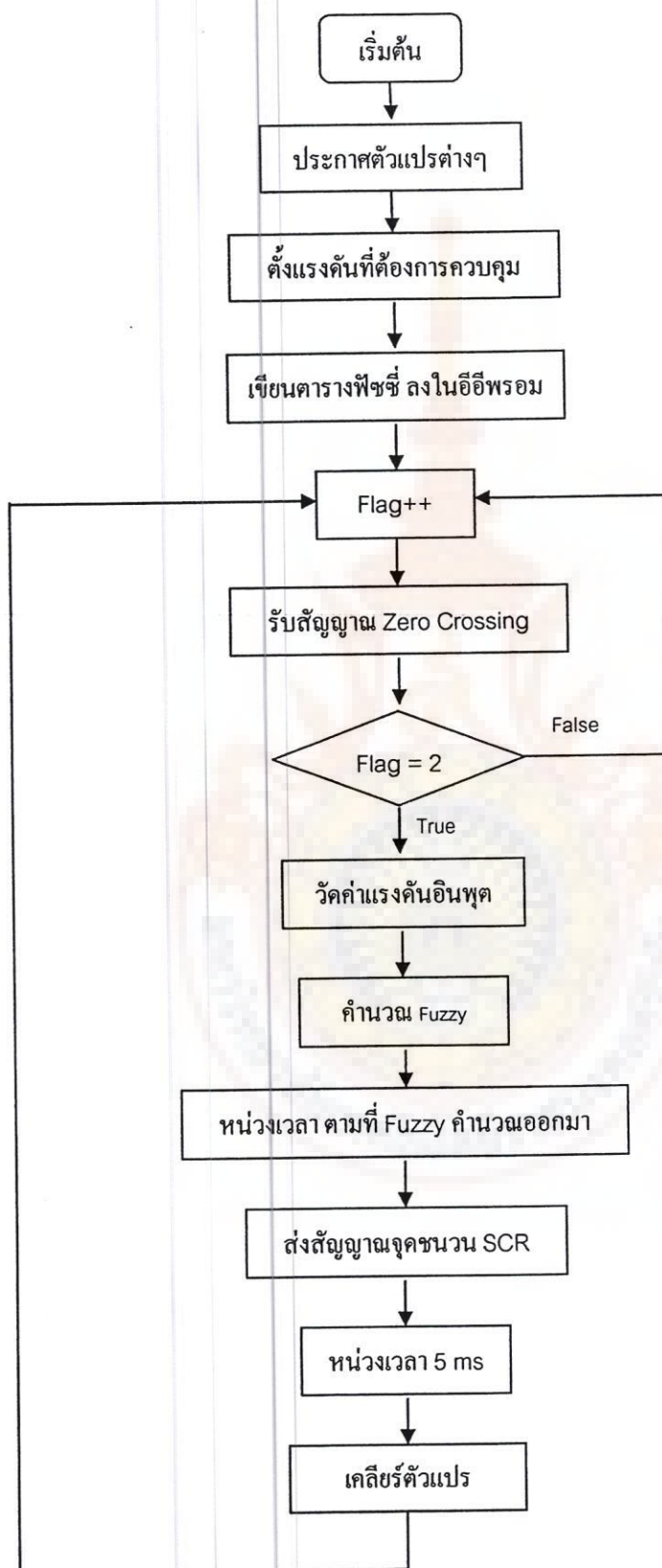


รูปที่ 3-15 ขั้นตอนการประมวลผลของฟัซซี่ลอจิกขั้นตอนที่ 4



รูปที่ 3-16 บล็อกคอนโทรลของโปรแกรม





รูปที่ 3-17 การทำงานของโปรแกรม

การออกแบบในส่วนซอฟต์แวร์นี้จะใช้โปรแกรม PIC C CCS COMPILER ที่ใช้ภาษาซีในการคอมไพล์โปรแกรม ก่อนที่จะโปรแกรมลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A สามารถแบ่งออกเป็นโปรแกรมย่อยหลักๆได้ดังนี้

โปรแกรมย่อยตารางพีชชี โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่จะทำการเขียนตารางพีชชีลงไป ในอีพ롬ของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยตารางนี้ได้ถูกออกแบบไว้แล้ว ซึ่งรูปแบบการเขียนโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังนี้

```

for(i=11; i<=16; i++) {write_eeprom(i,52); }
for(i=17; i<=21; i++) {write_eeprom(i,46);}
for(i=22; i<=27; i++) {write_eeprom(i,52);}
for(i=28; i<=32; i++) {write_eeprom(i,46);}
for(i=33; i<=35; i++) {write_eeprom(i,52);}
for(i=36; i<=38; i++) {write_eeprom(i,49);}
for(i=39; i<=43; i++) {write_eeprom(i,43);}
for(i=44; i<=46; i++) {write_eeprom(i,52);}
for(i=47; i<=49; i++) {write_eeprom(i,46);}
for(i=50; i<=54; i++) {write_eeprom(i,0);}
for(i=55; i<=57; i++) {write_eeprom(i,49);}
for(i=58; i<=59; i++) {write_eeprom(i,46);}
for(i=60; i<=60; i++) {write_eeprom(i,43);}
for(i=61; i<=62; i++) {write_eeprom(i,0);}
for(i=63; i<=65; i++) {write_eeprom(i,43); }
for(i=66; i<=70; i++) {write_eeprom(i,46); }
for(i=71; i<=73; i++) {write_eeprom(i,0); }
for(i=74; i<=76; i++) {write_eeprom(i,6); }
for(i=77; i<=81; i++) {write_eeprom(i,43); }
for(i=82; i<=84; i++) {write_eeprom(i,3); }
for(i=85; i<=87; i++) {write_eeprom(i,9); }
for(i=88; i<=92; i++) {write_eeprom(i,0); }
for(i=93; i<=95; i++) {write_eeprom(i,6); }
for(i=96; i<=98; i++) {write_eeprom(i,12); }

```

```

for(i=99; i<=103; i++) {write_eeeprom(i,3); }
for(i=104; i<=106; i++) {write_eeeprom(i,9); }
for(i=107; i<=109; i++) {write_eeeprom(i,12); }
for(i=110; i<=114; i++) {write_eeeprom(i,6); }
for(i=115; i<=120; i++) {write_eeeprom(i,12); }
for(i=121; i<=125; i++) {write_eeeprom(i,6); }
for(i=126; i<=131; i++) {write_eeeprom(i,12); }

```

หลักการการทำงานของโปรแกรม โปรแกรมจะทำการเขียนค่าต่าง ๆ ที่อยู่ในตารางลงในอีอีพรอมของไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อโปรแกรมคำนวณพีชชีที่คำนวณได้ ก็จะดึงค่าในตารางจากแอดเดรสของอีอีพรอมได้ทันที

ตารางที่ 3-1 ตารางพีชชีที่เขียนลงในอีอีพรอม

Angle	Delta Angle								
	NL	NM	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	NVS	ZE
NM	NL	NL	NL	NL	NM	NS	NVS	ZE	PVS
NS	NL	NL	NL	NM	NS	NVS	ZE	PVS	PS
NVS	NL	NL	NM	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PM
ZE	NL	NM	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PM	PL
PVS	NM	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PM	PL	PL
PS	NS	NVS	ZE	PVS	PS	PM	PL	PL	PL
PM	NVS	ZE	PVS	PS	PM	PL	PL	PL	PL
PL	ZE	PVS	PS	PM	PL	PL	PL	NL	PL

โปรแกรมย่อยคำนวณพีชชีลอจิกคอนโทรล เป็น โปรแกรมที่ใช้ควบคุมระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีหลักการตามทฤษฎีพีชชี ซึ่งรูปแบบการเขียนโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังนี้

- (1) error = setpoint - v;
- (2) errorch = error - error\_old;



```

(3) error_old = error;
(4) if (error >= 150) err = 11;
(5) else if((error >= 80)&&(error < 150)) err = 10;
(6) else if((error >= 40)&&(error < 80)) err = 9;
(7) else if((error >= 15)&&(error < 40)) err = 8;
(8) else if((error >= 4)&&(error < 15)) err = 7;
(9) else if((error >= -4)&&(error < 4)) err = 6;
(10) else if((error >= -15)&&(error < -4)) err = 5;
(11) else if((error >= -40)&&(error < -15)) err = 4;
(12) else if((error >= -80)&&(error < -40)) err = 3;
(13) else if((error >= -150)&&(error < -80)) err = 2;
(14) else err = 1;
(15)if (errorch >= 150) errch = 10;
(16)else if((errorch >= 80)&&(errorch < 150)) errch = 9;
(17)else if((errorch >= 40)&&(errorch < 80)) errch = 8;
(18)else if((errorch >= 15)&&(errorch < 40)) errch = 7;
(19)else if((errorch >= 4)&&(errorch < 15)) errch = 6;
(20)else if((errorch >= -4)&&(errorch < 4)) errch = 5;
(21)else if((errorch >= -15)&&(errorch < -4)) errch = 4;
(22)else if((errorch >= -40)&&(errorch < -15)) errch = 3;
(23)else if((errorch >= -80)&&(errorch < -40)) errch = 2;
(24)else if((errorch >= -150)&&(errorch < -80)) errch = 1;
(25)else errch = 0;
(26)position = ((err*11)+errch);
(27)output = read_eeprom(position);
(28)if (output == 12) {ut = (ut - 9);}
(29)if (output == 9) {ut = (ut - 5);}
(30)if (output == 6) {ut = (ut - 2);}
(31)if (output == 3) {ut = (ut - 1);}
(32)if (output == 0) {ut = (ut);}

```



(33)if (output == 43) {ut = (ut + 1);}

(34)if (output == 46) {ut = (ut + 2);}

(35)if (output == 49) {ut = (ut + 5);}

(36)if (output == 52) {ut = (ut + 9);}

(37)if(ut < 100) ut = 100;

(38)if(ut > 2610) ut = 2610;

หลักการดำเนินงานของโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลัก ๆ ตามทฤษฎีของฟัชซี ดังนี้

ส่วนแรก เป็น ขั้นตอนที่ 1 ของการควบคุมแบบฟัชซี เป็นการแปลงการอินพุตแบบบิตวิ  
นัยเปลี่ยนเป็นการอินพุตแบบตัวแปรฟัชซี โดยจะอยู่ในส่วนของบรรทัดที่ (1) – (3)

ส่วนที่ 2 เป็น ขั้นตอนที่ 2 ของฟัชซีลอจิก เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างการอินพุต  
ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับเอาต์พุตที่อาศัยหลักการหาเหตุและผล โดยจะอยู่ในส่วนของบรรทัดที่ (4) –

(25)

ส่วนที่ 3 เป็น ขั้นตอนที่ 3 ของฟัชซีลอจิก เป็นการหาฟัชซีเอาต์พุต โดยการนำกฎการ  
ควบคุมที่สร้างขึ้น ในขั้นตอนที่ 2 มาประมวลผลกับฟัชซีอินพุต โดยใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ โดย  
จะอยู่ในส่วนของบรรทัดที่ (26) – (27)

ส่วนที่ 4 เป็นขั้นตอนสุดท้ายหรือขั้นตอนการสรุปเหตุผลฟัชซี โดยจะเปลี่ยนฟัชซีเอาต์พุต  
ให้เป็นทวินัยเอาต์พุตตามภาพ และด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์ โดยจะอยู่ในส่วนของบรรทัดที่ (28) –

(38)

โปรแกรมย่อยในส่วนของควบคุมแรงดันเอาต์พุต เป็นโปรแกรมย่อยที่ใช้ หน่วงเวลามุม  
จุกชนวน โดยจะรับสัญญาณจับมุมเฟส และ รับสัญญาณ อนาคต เป็น คิจิตัล จากวงจรวัดระดับ  
แรงดันเป็น ให้ฟัชซีประมวลผล และคำนวณมุมจุกชนวน แล้วจากนั้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำ  
การหน่วงเวลาเพื่อจุกชนวนมุมที่ฟัชซีได้ทำการคำนวณไว้แล้ว ซึ่งรูปแบบการเขียน โปรแกรม  
สามารถแสดง ได้ดังนี้

(1) while(!input(PIN\_B0)){

(2) flag3 = 1;

(3) if(flag2 > 2){

(4) value = Read\_ADC();

(5) v = ((1.311 \* value)- 674.7);

(6) fuzzy();

(7) flag2 = 0;}

```

(8) while(flag1 > 2){
(9) for(i=0; i<=ut; i++){
(10) delay_us(1);}
(11) output_high(PIN_B1);
(12) flag1 = 0;
(13) delay_ms(5);
(14) output_low(PIN_B1);} }
(15) while(input(PIN_B0)){
(16) if(flag3 == 1){
(17) output_low(PIN_B1);
(18) flag1++;
(19) flag2++;
(20) flag3 = 0;}}

```

หลักการการทำงานของโปรแกรมแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ

1) ขณะสัญญาณจากวงจรจับมุมเฟสอยู่ในช่วงสัญญาณเป็น 1 จะอยู่ระหว่างบรรทัดที่ (1) – (14) ซึ่งการทำงานของโปรแกรมส่วนนี้จะทำการ วัดระดับแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และทำการคำนวณพีชชีเพื่อคำนวณมุมจุดชนวนที่เหมาะสม และหน่วงเวลา เพื่อทำการส่งสัญญาณเพื่อจุดชนวนมุมเกต ของเอสซีอาร์

2) ขณะสัญญาณจากวงจรจับมุมเฟสอยู่ในช่วงสัญญาณเป็น 0 จะอยู่ระหว่างบรรทัดที่ (15) – (20) ซึ่งโปรแกรมส่วนนี้จะทำการเคลียร์ตัวแปรและทำการนับลูกคลื่นที่เข้ามาเพื่อทำการคำนวณของพีชชีลอจิกเพื่อหามุมจุดชนวนที่เหมาะสม

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

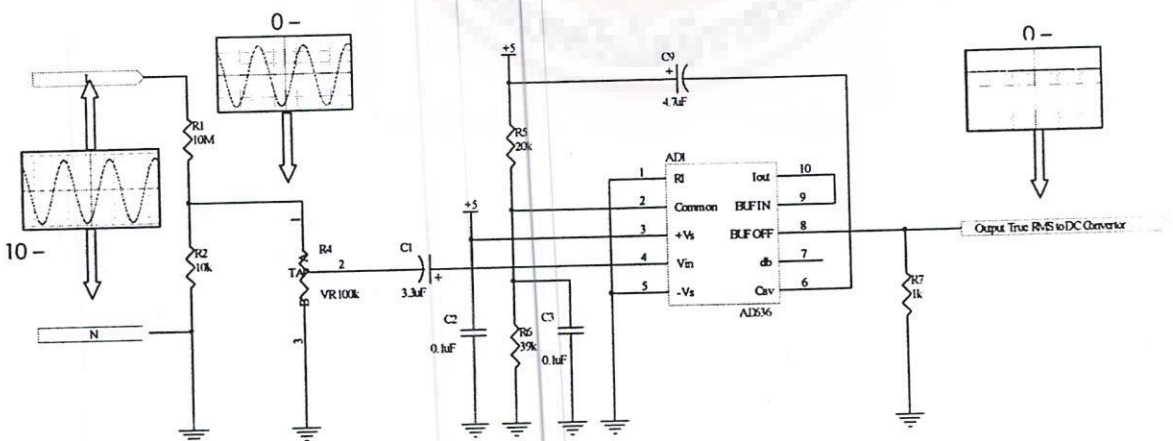
หลังจากที่ได้ออกแบบวงจรควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์แล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบการทำงานของส่วนวงจรต่างๆ เพื่อปรับแต่งวงจรให้ทำงานได้ตามที่ได้รับ การออกแบบไว้ และการทดสอบการรักษา ระดับแรงดันด้วยพีซีซึ่งล่อจิก โดยแบ่งเป็นการทดลองแต่ละส่วนดังนี้

#### 4.1 ผลการทดลองของวงจรต่างๆในระบบ

การทดลองนี้จะใช้วารริแอก ซึ่งสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับทำหน้าที่แทน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตแรงดันไฟฟ้าในระดับต่างๆ ซึ่งต้องการให้ทราบค่าต่างๆ โดยมี การทดลองดังนี้

##### 4.1.1 การทดลองวงจรวัดระดับแรงดัน

ในส่วนของวงจรวัดระดับแรงดันซึ่งเป็นวงจรตรวจวัดระดับแรงดันที่ผลิตได้จาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและค่าป้อนระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อใช้ ประมวลผลต่อไปนั้น จะจำลองการทำงานของแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ผลิตได้ด้วยวารริ แอ็ค โดยทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นไปเรื่อยๆ จากนั้นทำการวัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายและวัดแรงดันที่ ตกคร่อม R2 ซึ่งเป็นอินพุตของวงจรตรวจวัดระดับแรงดัน โดยได้เป็นระดับแรงดัน  $V_{rms}$  และวัด ระดับแรงดันที่ตกคร่อม R7 ซึ่งเป็นเอาท์พุตของวงจรตรวจวัดระดับแรงดัน และบันทึกค่าผลการ ทดลองในตารางที่ 4-1



รูปที่ 4-1 ตำแหน่งการวัดสัญญาณต่างๆ ของวงจรวัดระดับแรงดัน

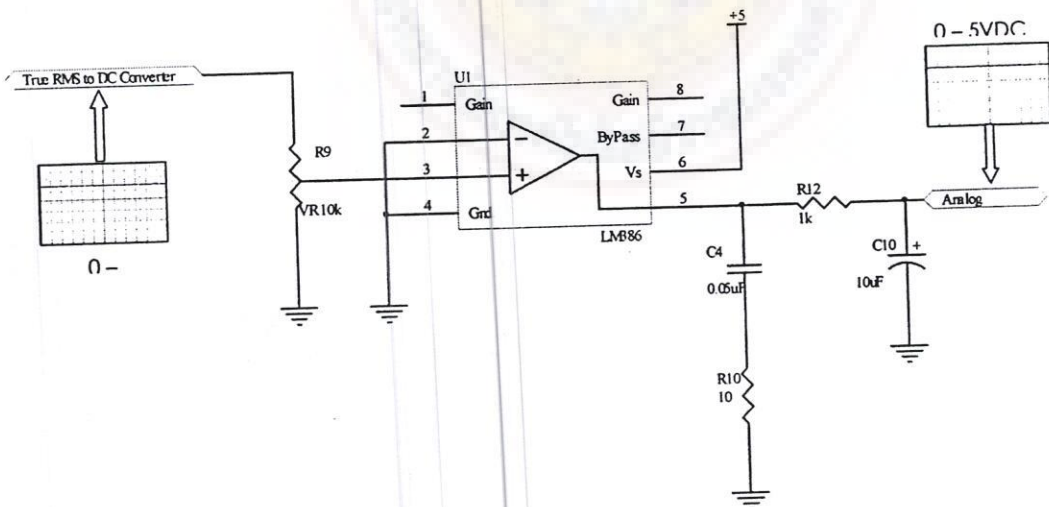


ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองวงจรตรวจวัดระดับแรงดัน

แรงดันที่ขั้ว (Vrms)	แรงดันอินพุต AD636JH (mVrms)	แรงดันเอาต์พุต AD636JH (mVDC)
100	25.9	25.9
120	31.1	31.1
140	36.3	36.3
160	41.5	41.5
180	46.7	46.7

จากผลการทดลองเมื่อปรับวาร์ริเอเตอร์จ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่ 100 โวลท์ จะทำให้แรงดันตกคร่อมที่ R2 จำนวน 25.9 โวลท์ และมีแรงดันกระแสตรงด้านเอาต์พุตของไอซี AD636JH ซึ่งตกคร่อม R7 จำนวน 25.9 โวลท์ ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ตรงกับทางแรงดันด้านอินพุต

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของไอซี AD636JH มีระดับเป็นมิลลิโวลท์ ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่ต่ำเกินไป จึงจำเป็นต้องขยายสัญญาณก่อนป้อนให้กับระบบแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งต้องการระดับแรงดันระหว่าง 0-5 โวลท์ ซึ่งจากการออกแบบได้ใช้ออปแอมป์ LM386 เป็นวงจรขยายสัญญาณประมาณ 20 เท่า และยกระดับแรงดัน โดยทำการวัดระดับแรงดันอินพุตและระดับแรงดันเอาต์พุตวงจรขยายได้ผลดังตาราง

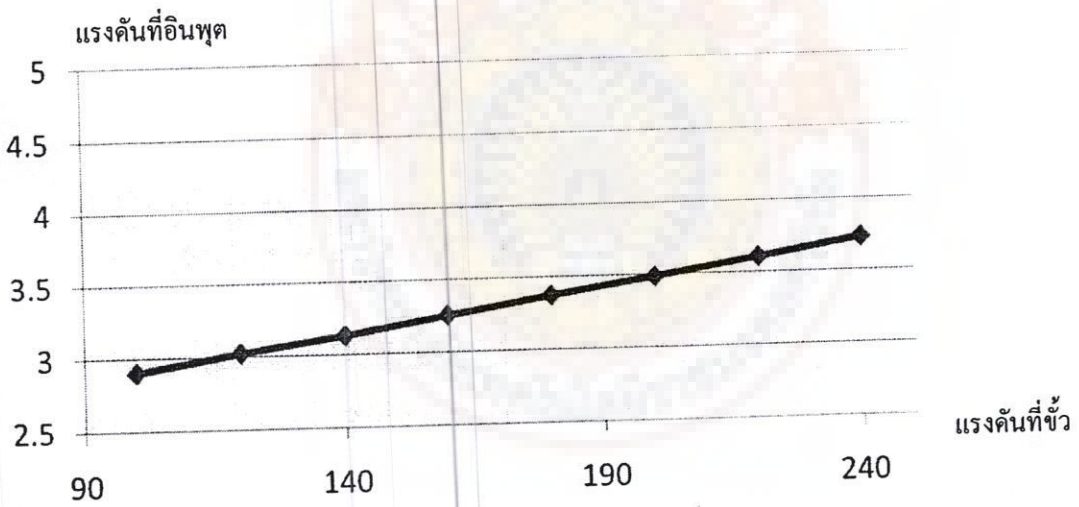


รูปที่ 4-2 ตำแหน่งของการวัดสัญญาณของวงจรขยายแรงดัน



ตารางที่ 4-1 แสดงผลการเปรียบเทียบแรงดันอินพุต กับ แรงดันที่แปลงค่าแล้ว

แรงดันที่ขั้ว (Vrms)	แรงดันอินพุต AD636JH (mVrms)	แรงดันเอาต์พุต AD636JH (mVDC)	แรงดันอินพุต MCU (VDC)
100	25.9	25.9	2.88
120	31.1	31.1	3.02
140	36.3	36.3	3.12
160	41.5	41.5	3.26
180	46.7	46.7	3.37
200	51.9	51.9	3.5
220	57.1	57.1	3.63
240	62.3	62.3	3.75



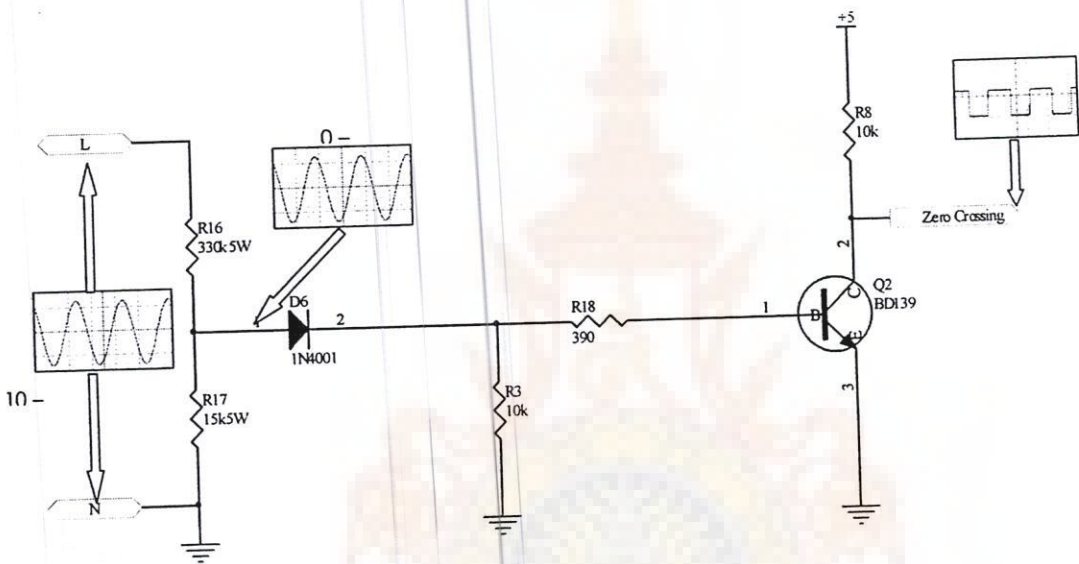
รูปที่ 4-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอินพุตกับแรงดันเอาต์พุตของวงจรตรวจวัดระดับ

แรงดัน

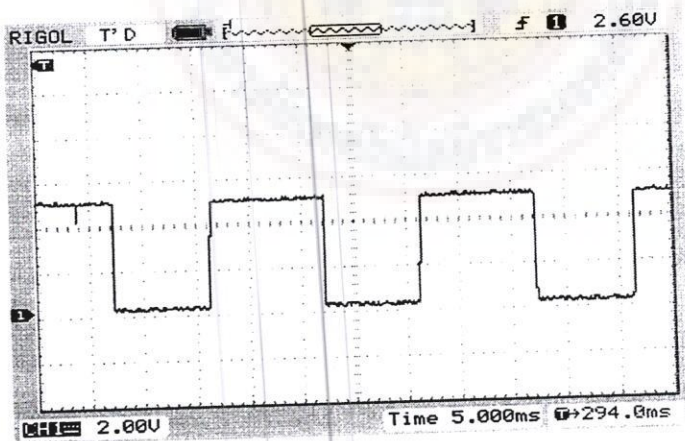
### 4.1.2 ทดลองวงจรวัดมุมเฟส

วงจรตรวจวัดมุมเฟสเป็นวงจรตรวจจับมุมศูนย์ของสัญญาณไซน์ เพื่อใช้เป็นมุมอ้างอิง

ในการสร้างสัญญาณทริกเอตซีอาร์ โดยเอาท์พุทของวงจรมีลักษณะเป็นแบบคิจิตอลตามการทำงานของทรานซิสเตอร์ ซึ่งหากสัญญาณอินพุตเป็นครึ่งบวกจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานเนื่องจากได้รับไบอัสตรงที่ขา B เป็นผลให้อาท์พุทมีลอจิกเป็น 0 และหากสัญญาณอินพุตเป็นครึ่งลบจะทำให้ทรานซิสเตอร์หยุดทำงานเป็นผลให้อาท์พุทมีลอจิกเป็น 1



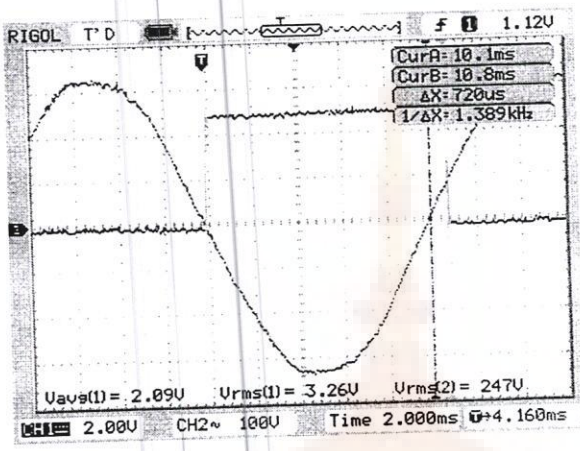
รูปที่ 4-4 ตำแหน่งการวัดสัญญาณต่าง ๆ ของผลการทดสอบวงจรวัดมุมเฟส



รูปที่ 4-5 ผลการทดสอบเอาต์พุทของวงจรวัดมุมเฟส

ผลที่ได้จากการทดสอบวงจรวัดมุมเฟส จากการทดลองปรับแรงดันด้วยวาร์ริแอด โดยจะทำการปรับตั้งแต่ 0 โวลต์ จนถึง 240 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ต แล้วใช้ออสซิลโลสโคปวัดที่ขา

คอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ จะได้เป็นสัญญาณพัลส์รูปสี่เหลี่ยม 5 โวลต์ ที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ ตามที่ได้ออกแบบไว้

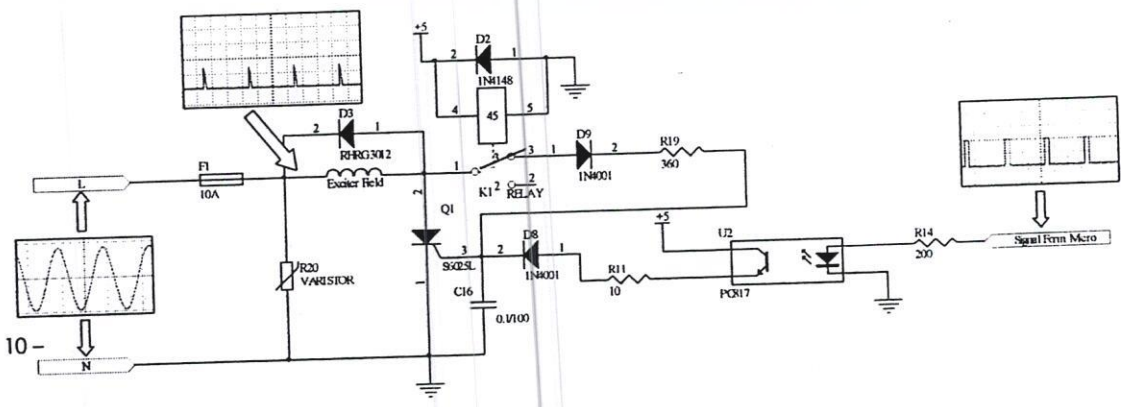


รูปที่ 4-6 เปรียบเทียบมุมเฟสของแรงดันอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรควบคุมเฟส

จากรูปที่ 4-6 จะเห็นได้ว่าสัญญาณของวงจรจับมุมเฟสจะเกิดขึ้นหลังจากสัญญาณอินพุตอยู่ที่ 0 องศาไปเป็นเวลา 720 ไมโครวินาที ดังนั้นวงจรนี้สามารถควบคุมได้ที่ตั้งแต่มุม 13 องศา ถึง 180 องศา

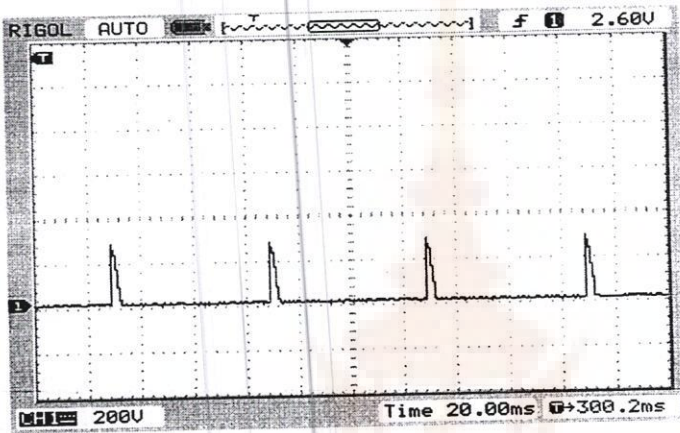
### 4.1.3 การทดลองวงจรควบคุมกระแสฟัลลคอยล์

วงจรควบคุมกระแสฟัลลคอยล์จะเป็นวงจรควบคุมการสร้างสนามแม่เหล็กของฟัลลคอยล์ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแปรผันตามกระแสฟัลลคอยล์ ในการทดลองนี้จะเป็นการทดสอบการใช้สัญญาณตรีกกับเอสซีอาร์เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฟัลลคอยล์ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าสร้างสัญญาณตรีกมาควบคุมเอสซีอาร์ผ่านทางไอซีออปโตไดร์ PC817 แล้วทำการวัดสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลด





ไมโครคอนโทรลเลอร์จะรับค่าแรงดันจากวงจรตรวจวัดระดับแรงดัน และวงจรวัดมุมเฟส แล้วจะทำการคำนวณแบบพีซีซีลอจิก เพื่อหาค่ามุมทริกที่เหมาะสมแล้วส่งสัญญาณออกไปเพื่อจุดชนวนขาเกตของเอสซีอาร์ ซึ่งผลการทดสอบได้ผลออกมาดังรูปที่ 4-21 เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งสัญญาณจุดชนวนให้กับ เอสซีอาร์ เอสซีอาร์ก็จะนำกระแส ตามมุมต่าง ๆ ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งดังรูปที่ 4-8

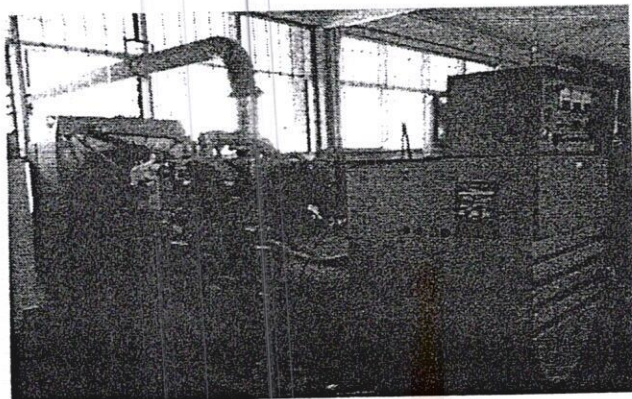


รูปที่ 4-8 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมฟิลคอยล์

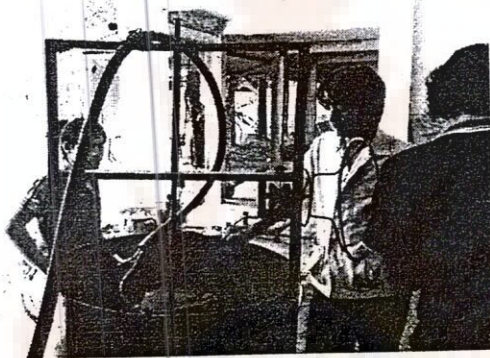
#### 4.2 ผลตอบสนองการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การทดลองนี้เป็นการทดสอบการใช้งานจริงในการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส แบบซิงโครนัส ยี่ห้อ CATERPILLAR โมเดล SR-4 มีความเร็ว 1500 รอบต่อนาที มีความถี่ 50 Hz พิกัด 155 kW เอ็กไซเตอร์ฟิลคอยล์มีพิกัดแรงดัน 22.5 โวลท์และกระแส 8 แอมป์ โดยทั่วไปแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหากมีโหลดเปลี่ยนแปลงมากขึ้นหรือน้อยลง จะทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ขั้วเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย ซึ่งเป็นหน้าที่ของเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าจะต้องรักษาระดับแรงดันให้คงที่เท่ากับแรงดันก่อนโหลดเปลี่ยนแปลง โดยการควบคุมปริมาณกระแสของฟิลคอยล์ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการตรวจวัดระดับแรงดันไฟฟ้าเข้ามาทางระบบแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล แล้วเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง แล้วดำเนินการประมวลผลด้วยระบบพีซีซีลอจิก เพื่อคำนวณหาค่ามุมทริกที่เหมาะสมในการในการป้อนสัญญาณทริกแก่เอสซีอาร์ เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ต่อไป ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้ก้านอิเล็กทรอนิกส์มาต่อเป็น 3 เฟสแซ่วไว้ในถังน้ำเกลือ จำลองเป็นโหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อการตอบสนองของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลงที่ขนาดต่างๆ ดังในรูปที่ 4-11

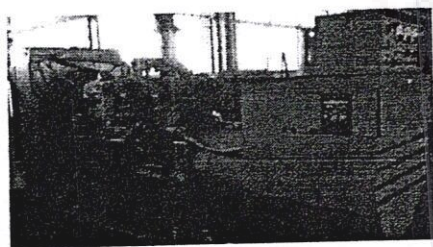




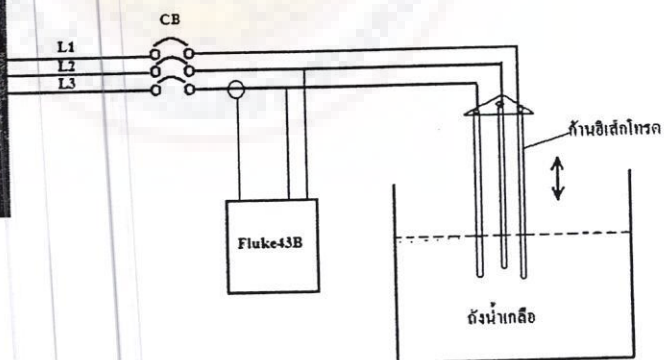
รูปที่ 4-9 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 155 kW



รูปที่ 4-10 ถังน้ำเกลือที่ใช้ทำการทดลอง



เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส

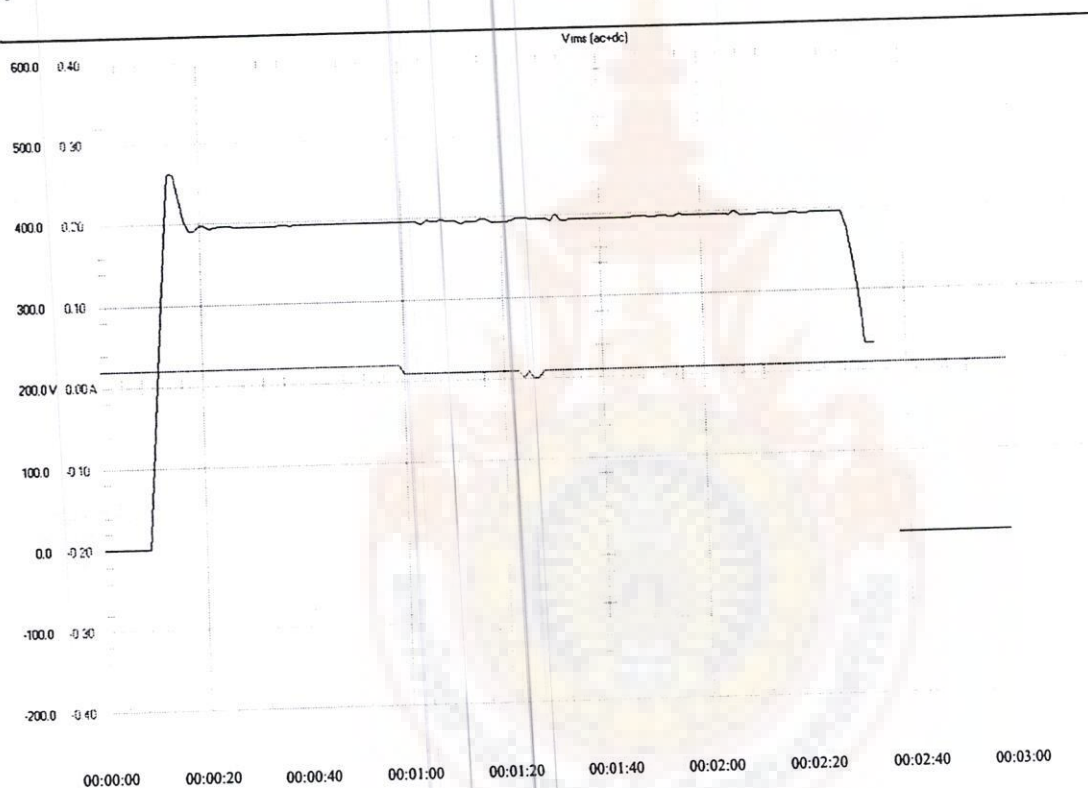


รูปที่ 4-11 ไดอะแกรมวงจรการทดลอง

#### 4.2.1 ผลตอบสนองการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในสถานะไม่มีโหลด

มีโหลด

การทดลองนี้เป็นการทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่ที่ระดับแรงดันไฟฟ้าประมาณ 395 โวลต์ โดยการสตาร์ทเครื่องยนต์ให้ทำงานที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะที่ไม่มีโหลด (No Load) บันทึกผลการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละช่วงเวลาด้วยเครื่องมือวัดยี่ห้อ Fluke 43B ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4- 12



รูปที่ 4-12 กราฟแสดงผลตอบสนองในสถานะไม่มีโหลดต่ออยู่

จากรูปที่ 4-12 แสดงผลตอบสนองในสถานะไม่มีโหลด จะเห็นได้ว่า ช่วงแรกที่ 10 วินาที แรงดันเกิดโอเวอร์ชู้ตในช่วงนี้เพราะสาเหตุจากไมโครคอนโทรลเลอร์ยังไม่ทำงานโดยใช้วงจรถักชนวนเกดอัดโนมตีในการควบคุมแรงดัน แต่เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์เริ่มทำงานแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จะควบคุมระดับแรงดันให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าประมาณ 395 โวลต์และระดับแรงดันจะคงที่ตลอดไป

ตารางที่ 4-3 สรุปผลการทดลองรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

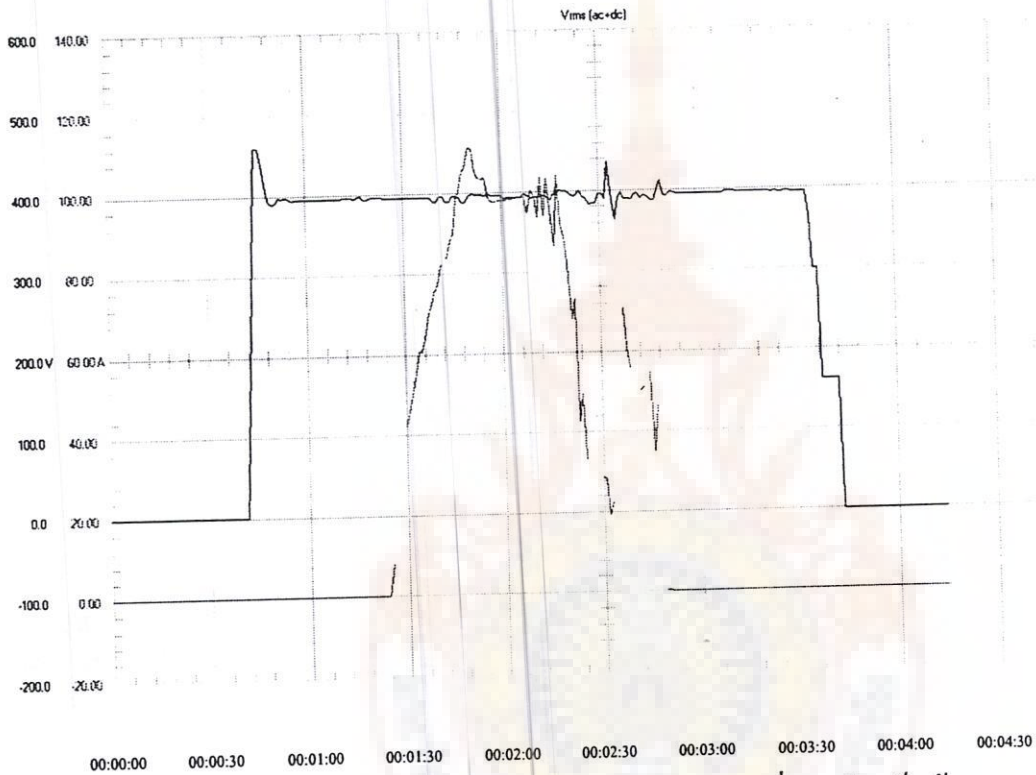
เวลา (นาทื)	แรงดันไฟฟ้าที่ กำหนด(โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าจริง (โวลต์)	กระแส(แอมป์)	ค่าความผิดพลาด ของแรงดัน
00:40	395	390	0	1.2%
00:41	395	396	0	0.2%
00:42	395	396	0	0.2%
00:43	395	396	0	0.2%
00:44	395	395	0	0%
00:45	395	399	0	1%
00:46	395	398	0	0.7%
00:47	395	395	0	0%
00:48	395	395	0	0%

#### 4.2.2 ผลตอบสนองการรักษาระดับแรงดันขณะมีโหลด

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการรักษาระดับแรงดันของเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยฟิวซ์ลอคจิกสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส ขณะโหลดเปลี่ยนแปลงปริมาณกระแสไม่มาก โดยการทดลองนี้จะใช้ก้านอิเล็กทรอนิกส์โทรคต่อแบบ 3 เฟส มาเช้ไว้ในถังน้ำเกลือ ทำหน้าที่เป็นโหลดชนิด 3 เฟสของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งขนาดพิกัดของโหลดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับของก้านอิเล็กทรอนิกส์ที่จุ่มในถังน้ำเกลือ หากเพิ่มความลึกของแท่งอิเล็กทรอนิกส์จะทำให้ความต้านทานระหว่างแท่งอิเล็กทรอนิกส์น้อยลงเป็นผลให้พิกัดของโหลดมากขึ้น โดยในการทดลองจะสตาร์ทเครื่องยนต์ให้ขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ความเร็ว 1500 รอบต่อนาที แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า บันทึกผลการวัดระดับแรงดันไฟฟ้าแต่ละช่วงเวลาด้วยเครื่องมือวัดคือหือ Fluke 43B เมื่อเครื่องควบคุมระดับแรงดันจะทำหน้าที่รักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ จากนั้นจะเพิ่มโหลดที่น้อยโดยการเพิ่มระดับความลึกของก้านอิเล็กทรอนิกส์ในถังน้ำเกลือ จนกระทั่งกระแส



ถึง 100 A จึงหยุด หลังจากนั้นก็ทำการลดความลึกของก้านอิเล็กโทรด จนกระทั่งปลายของก้านอิเล็กโทรดโผล่พ้นจากถังน้ำเกลือ ซึ่งผลการทดลองได้ผลออกมาดังรูปที่ 4-13



รูปที่ 4-13 กราฟแสดงผลตอบสนองในสถานะโพลเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

หลังจากเครื่องยนต์ทำงานขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าจะรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีโพล ให้คงที่ที่ระดับแรงดันอ้างอิง 395 โวลต์ หลังจากนั้นทำการเพิ่มโพลโดยการเพิ่มความลึกของก้านอิเล็กโทรดที่ละเล็กน้อย ซึ่งจะเห็นกราฟของกระแสเพิ่มขึ้น จนกระทั่งได้กระแสประมาณ 100 แอมป์ แต่ระดับแรงดันยังคงที่ที่ 395 โวลต์ หลังจากนั้นทำการลดขนาดของโพลโดยการลดระดับความลึกของก้านอิเล็กโทรดจนกระทั่งปลายของก้านอิเล็กโทรดโผล่พ้นระดับน้ำเกลือ ซึ่งจะเห็นว่าขนาดกระแสจะลดลงจนกระทั่งเป็น 0 แอมป์ แต่ระดับแรงดันยังคงที่ที่ 395 โวลต์ จึงเห็นได้ว่าเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วให้คงที่ได้ในขณะที่โพลมีการเปลี่ยนแปลง

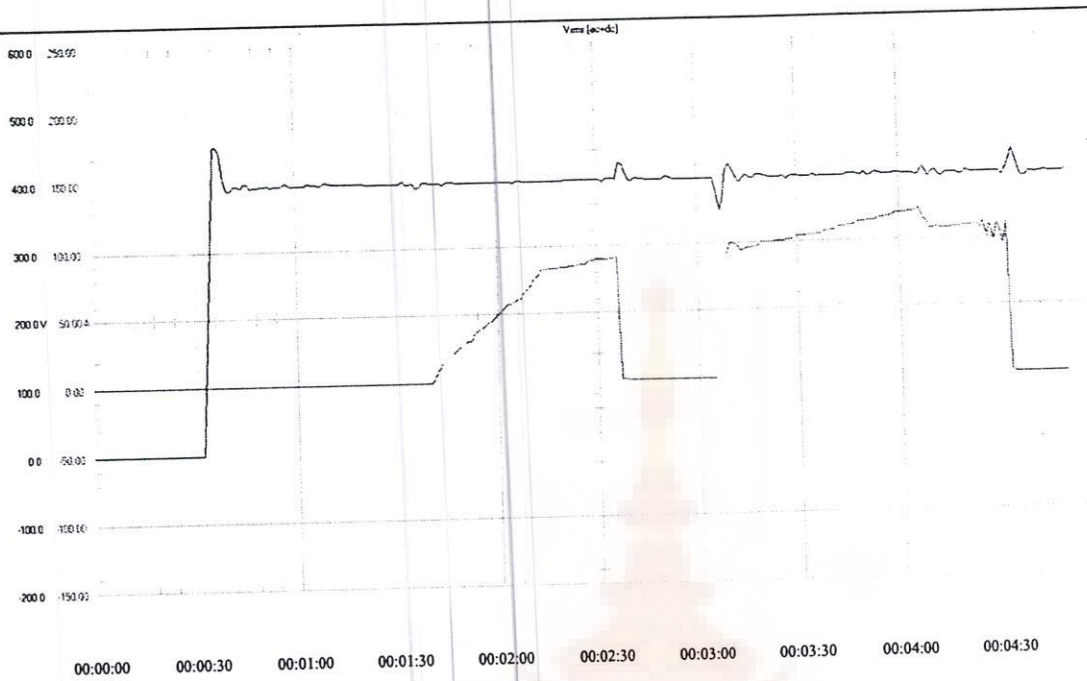


ตารางที่ 4-4 สรุปผลการทดลองจากรูปที่ 4-13

เวลา (นาที)	แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าจริง (โวลต์)	กระแส (แอมป์)	ค่าความผิดพลาดของแรงดัน
1:40	395	395	0	0%
1:45	395	397	20	0.5%
1:50	395	395	29	0%
1:55	395	395	39	0%
2:00	395	396	48	0.2%
2:05	395	392	60	0.7%
2:10	395	395	72	0%
2:15	395	395	83	0%
2:20	395	396	84	0.2%
2:25	395	396	86	0.2%
2:30	395	396	90	0.2%
2:35	395	397	90	0.5%

#### 4.2.3 ผลตอบสนองของการรักษาระดับแรงดันขณะโหลดเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการรักษาระดับแรงดันขณะโหลดเปลี่ยนแปลงปริมาณมากอย่างทันทีทันใด โดยการทดสอบในขั้นตอนนี้จะจุ่มแท่งอิเล็กโทรดลงไปในความลึกระดับที่ต้องการ แล้วทำการสตาร์ทเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ขณะที่ยังไม่เปิดเบรกเกอร์จ่ายกระแสให้แก่โหลด เมื่อเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ที่ 395 โวลต์แล้ว ทำการเปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อจ่ายโหลดแบบทันทีทันใด ซึ่งจะทำการทดลองการเพิ่มโหลดแบบทันทีทันใดที่ปริมาณกระแส 80-100 แอมป์ แล้วให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขับโหลดต่อไป แล้วทำการปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อปลดโหลดแบบทันทีทันใด ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4-14



รูปที่ 4-14 สรุปรูปกราฟแสดงผลตอบสนองในสถานะต่าง ๆ

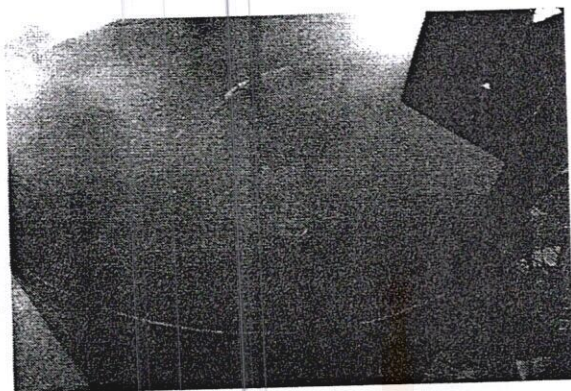
หลังจากเครื่องขนค้ทำงานขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าจะรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด ให้คงที่ที่ระดับแรงดันอ้างอิง 395 โวลท์ แล้วทำการเปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อจ่ายโหลดขนาด 80 แอมป์อย่างทันทีทันใด จะเห็นได้ว่าขณะจ่ายเริ่มต้นขับโหลด กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างทันที ซึ่งจะทำให้แรงดันตกต่ำกว่าแรงดันอ้างอิง เนื่องจากโหลดเปลี่ยนแปลงปริมาณและรวดเร็วเป็นผลให้แรงดันตกชั่วคราว จากนั้นเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าจะดำเนินการปรับเปลี่ยนปริมาณกระแสฟีดล็คคอยล์ เพื่อควบคุมระดับแรงดันให้เท่ากับแรงดันอ้างอิง หลังจากระดับแรงดันไฟฟ้าคงที่ ที่ โหลดขนาด 80-100 แอมป์แล้วทำการทดลองปลดโหลดออกโดยการปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ ขนาดกระแสจะเป็น 0 แอมป์อย่างทันที ซึ่งจะเป็ผลให้แรงดันที่ขั้วเพิ่มขึ้น แต่เครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าจะดำเนินการปรับเปลี่ยนปริมาณกระแสฟีดล็คคอยล์เพื่อควบคุมระดับแรงดันให้เท่ากับแรงดันอ้างอิง จึงเห็นได้ว่าเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วให้คงที่ได้ในขณะที่โหลดมีการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4-5 สรุปผลการทดลองจากรูปที่ 4-26 (ขณะที่มีโหลด)

เวลา (นาที)	แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าจริง (โวลต์)	กระแส (แอมป์)	ค่าความผิดพลาดของแรงดัน
3:20	395	398	100	0.7%
3:25	395	395	100	0%
3:30	395	396	103	0.2%
3:35	395	398	105	0.7%
3:40	395	395	107	0%
3:45	395	397	110	0.5%
3:50	395	399	113	1%
3:55	395	397	116	0.5%
4:00	395	397	120	0.5%
4:05	395	395	120	0%

จากการทดลองโดยใช้โหลดเป็นก้านอิเล็กทรอนิกส์ในถังน้ำเกลือ เป็นผลให้เกิดความร้อนของน้ำสูงจนถึงเดือดเป็นผลให้ปริมาณของโหลดไม่คงที่ ทำให้โหลดเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยไม่สามารถควบคุมปริมาณโหลดให้คงที่ได้ ซึ่งบางครั้งจะเห็นได้ว่าช่วงหลังๆของการบันทึกผลการทดลองเมื่อน้ำร้อนจนถึงจุดเดือด ทำให้เห็นกระแสของการแกว่งเปลี่ยนแปลงไม่แน่นอน ซึ่งจะต้องหยุดทำการทดลองและต้องรอให้อุณหภูมิน้ำเกลือลดลงก่อนจึงจะสามารถดำเนินการทดลองใหม่ได้





รูปที่ 4-15 การทดลองขณะจุ่มก้านอิเล็กทรอนิกส์ในถังน้ำเกลือ





## บทที่ 5

### สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้นำเอาไมโครคอนโทรลเลอร์มาเป็นตัวประมวลผลแบบพีซีซีลอจิก คำนวณหาค่ามุมเฟสที่เหมาะสมในการทริกขาเกตแก๊สซีอาร์ เพื่อควบคุมแรงดันและกระแสที่จ่าย แก่ขดลวดฟิลต์คอยล์ ซึ่งทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กไปตัดกับขดลวดเพื่อสร้างแรงดันเอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส ซึ่งต้องผลิตแรงดันไฟฟ้าขนาด 380 V Line to Line หรือ 220 โวลต์ต่อ เฟส ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีพิกัด 155 KW ใช้เครื่องยนต์ซีเซลเป็นตัวต้นกำลัง ซึ่งจากระบบที่ได้ทำการออกแบบวงจรทางด้านฮาร์ดแวร์ ซึ่งมีวงจรตรวจวัดระดับแรงดันที่ผลิตได้ จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า วงจรตรวจจับมุมเฟส และวงจรควบคุมแก๊สซีอาร์ และชอร์ฟแวร์ซึ่ง ประมวลผลด้วยหลักการของพีซีซีลอจิก เห็นได้ว่าสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่อง กำเนิดไฟฟ้าให้ได้ตามระดับแรงดันที่กำหนดไว้ได้ ทั้งนี้ได้ทำการทดสอบการรักษาระดับแรงดันใน สภาวะต่างๆ เช่น กรณีการรักษาระดับแรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่มีโหลด กรณีรักษาระดับ แรงดันเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอยู่ในสภาวะมีโหลด และเมื่อโหลดเปลี่ยนแบบทันทีทันใด ซึ่ง ตัวเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยพีซีซีลอจิกสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส สามารถควบคุมและรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ที่ระดับที่กำหนดไว้ได้ทั้งในสภาวะต่างๆ ดัง การทดลองในบทที่ 4 ซึ่งทำให้การทำโครงการงานวิจัยครั้งนี้ต้องรู้และความมั่นใจในการ นำเอาระบบการควบคุมแบบพีซีซีมาประยุกต์ใช้ในงานการควบคุมได้จริง โดยสามารถนำองค์ ความรู้ที่ได้นี้ไปประยุกต์ในการควบคุมงานลักษณะอย่างอื่นได้อีก เช่นการควบคุมความเร็ว อุณหภูมิ ให้คงที่ได้เช่นเดียวกัน

การออกแบบวงจรของตัวเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยพีซีซีลอจิก สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส นี้ได้ทำการออกแบบแผ่นลายวงจรหรือแผ่น PCB และมีการจ้าง ทำแผ่นลายวงจรจากมืออาชีพทำให้แผ่นลายวงจรมีความสวยงามและทนทาน จึงสามารถที่จะ นำเอาลายวงจรนี้มาลงอุปกรณ์และบัดกรีได้ง่าย ซึ่งสามารถนำไปเป็นต้นแบบในการพัฒนาไปสู่ การนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ต่อไปได้

## บรรณานุกรม

- [1] เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัส. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.eerg.eng.rmutp.ac.th>
- [2] ตำราเรียนรู้ด้วยตนเอง อิเล็กทรอนิกส์กำลัง. โครงการความร่วมมือทางวิชาการระหว่าง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลกับสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพัฒนาเทคนิคศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [3] ชวิษชัย อรรถวิบูลย์กุล. เครื่องกลไฟฟ้า 3. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์ส่งเสริมอาชีพฯ, 2527.
- [4] ประจัน พลังสันติกุล. เรียนรู้และใช้งาน CCS C คอมไพเลอร์ เขียนโปรแกรมภาษา C ควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC. กรุงเทพมหานคร : บริษัท อินโนโวลทิฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด.
- [5] พีซีลอจิกคอนโทรล. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก <http://www.geocities.com/pisitp/logic.htm>

ภาคผนวก



# การควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยฟัซซี่ลอจิกสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส

## Auto Voltage Regulator with Fuzzy logic for three Phase Generator

สัญญา ผาสุข คณโฆ ปานทองคำ สุภชัย อรุณพันธ์

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ถ. ราชดำเนินนอก ต. บ่อหยง อ. เมือง จ. สงขลา 9000 โทรศัพท์ : 0-7431-7168 E-mail: psunya@hotmail.com

บทความวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบการควบคุมระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส ขนาดกำลัง 150 KW ให้คงที่ควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC เบอร์ 16F877 ทำการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงพบว่าสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ โดยมีความไม่เกิน 1 %

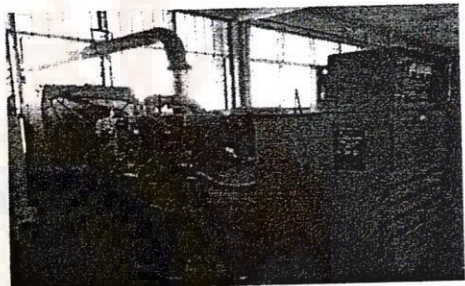
The research paper presents the study and design the auto regulator with fuzzy logic for three phase 150 kW generator. PIC 16F877 micro controller with fuzzy logic method is used to control current that apply to existing coil. This method can regulate voltage when load change with error less than 1 %

Fuzzy logic Auto Voltage Regulator control

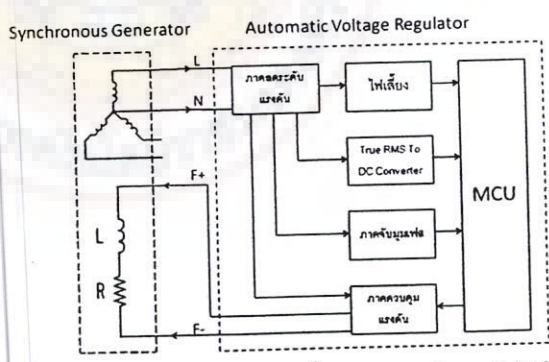
การเปลี่ยนแปลงโหลดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมีผลให้แรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย อาจทำให้โหลดอาจได้รับความเสียหายที่ระดับแรงดันที่สูงขึ้นหรือประสิทธิภาพต่ำลงเมื่อระดับแรงดันต่ำลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงด้วยเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า(Auto Voltage Regulator:AVR) ซึ่งโดยส่วนใหญ่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC เบอร์ 16F877 ทำการควบคุมกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้คงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลงพบว่าสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ โดยมีความไม่เกิน 1 %

### 2. การออกแบบ

เครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยฟัซซี่ลอจิกนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) ตระกูล PIC เบอร์ 16F877 เป็นตัวประมวลผลและควบคุมการทำงานของระบบด้วยฟัซซี่ลอจิก โดยมีภาคตรวจจับแรงดัน ภาคตรวจวัฏจักรระดับแรงดัน ภาคตรวจจัมป์มูฟเฟส และภาคควบคุมกระแสฟีดแบ็คคอยทำหน้าที่สร้างความเข้มของสนามแม่เหล็กซึ่งมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส ขนาด 150 KW



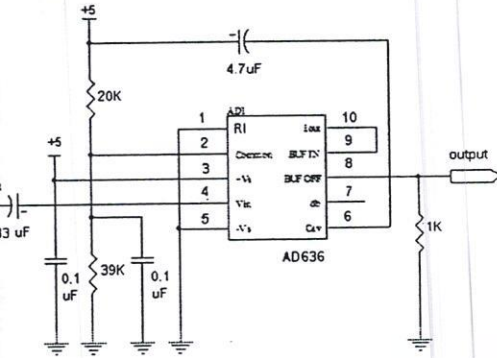
รูปที่ 2 โฉมแผนการทำงานของเครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

### 2.1 ภาควัฏจักรระดับแรงดันไฟฟ้า

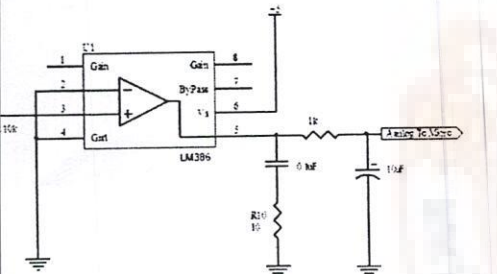
การออกแบบวงจรวัฏจักรระดับแรงดันไฟฟ้า ในส่วนแรกจะใช้วงจรแบ่งแรงดันเพื่อลดระดับแรงดันจากอินพุตสูงสุด 300 โวลต์ ให้เหลือไม่เกิน 0.2 โวลต์ โดยใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานขนาด 10



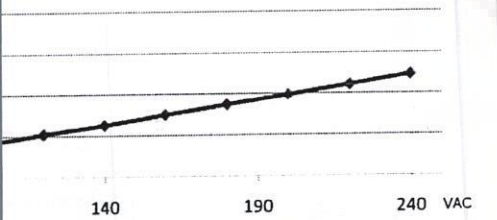
และ 10 กิโลโห์ม มาอนุกรมกัน เมื่อได้ระดับแรงดันตามที่  
 ะนำมาผ่านวงจร True RMS to DC Converter โดยใช้ ไอซี  
 AD636 เนื่องจากสัญญาณที่ออกมาจาก วงจร True RMS to DC  
 อยู่ที่ 0 - 0.2 โวลต์ดีซี (VDC) ดังนั้น ก่อนที่จะนำสัญญาณ  
 ไปคอนโทรลเลอร์ จะต้องทำการขยายสัญญาณด้วย ออปแอมป์  
 คำนวณไฟที่ระหว่าง 0 - 5 โวลต์ โดยใช้ออปแอมป์เบอร์  
 LM339 สัญญาณ 20 เท่า ก่อนป้อนเข้าสู่วงจรแปลงสัญญาณ  
 ดิจิตอลของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อประมวลผลต่อไป  
 และ 4 ตามลำดับ



3 วงจรตรวจวัดระดับแรงดันไฟฟ้าแบบ TRUE RMS



4 วงจรขยายสัญญาณเอาต์พุตจาก True RMS A636JH



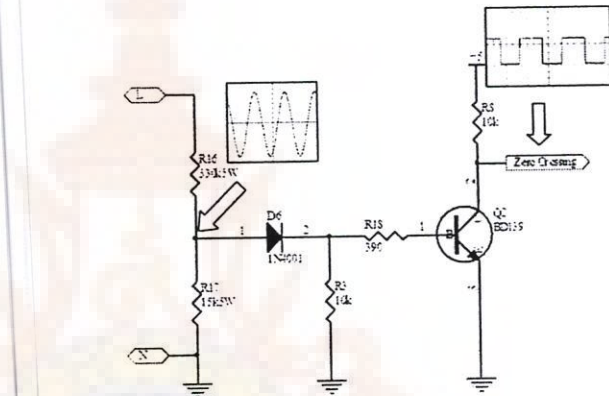
5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับกับค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ

**ตรวจจับมุมเฟส**

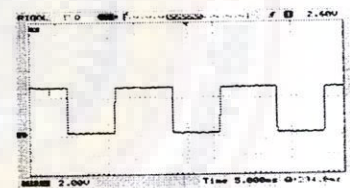
การตรวจจับมุมเฟส (Zero Crossing) เพื่อทำการตรวจจับ  
 มุมที่ 0 และ 180 องศา เพื่อใช้เป็นมุมอ้างอิงให้กับ  
 ทรานซิสเตอร์ในการควบคุมตำแหน่งมุมจุดชนวนของ SCR ซึ่ง

จะควบคุมแรงดันที่จะจ่ายให้แก่ขดฟิลต์ค้อยในการสร้างความเข้มของ  
 สนามแม่เหล็กเพื่อสร้างแรงดันเอาต์พุตจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การออกแบบ ในส่วนแรกจะใช้วงจรแบ่งแรงดันเพื่อลดระดับ  
 แรงดันจากอินพุต 300 โวลต์ ให้เหลือไม่เกิน 12 โวลต์ โดยใช้ตัว  
 ด้านทานที่มีค่าความต้านทานขนาด 330กิโลโห์ม และ 15 กิโลโห์ม มา  
 อนุกรมกัน เมื่อได้ระดับแรงดันตามที่ต้องการแล้วจะให้สัญญาณผ่าน  
 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นทางคานบวก หลังจากนั้นก็เอาสัญญาณที่  
 ได้ไป ไบอัส ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BD139 เมื่อทรานซิสเตอร์ถูกไบอัส  
 ทรานซิสเตอร์จะเป็นเหมือนสวิตช์เปิด ทำให้สัญญาณออกมาเป็น  
 ลักษณะพัลส์สี่เหลี่ยม 50 Hz เมื่อได้สัญญาณเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมแล้วก็นำ  
 สัญญาณเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้เป็น  
 มุมอ้างอิงในการจุดชนวน SCR ต่อไป



รูปที่ 6 วงจรตรวจจับมุมเฟส



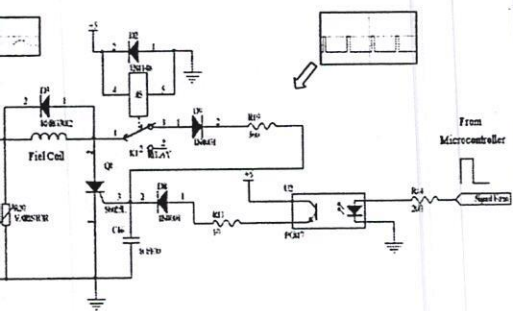
รูปที่ 7 เอาต์พุตของวงจรตรวจจับมุมเฟส

**2.3 ภาคควบคุมกระแสฟิลต์ค้อย**

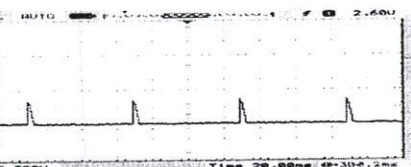
ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส นั้น  
 ขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่แปรผันตามกระแสที่ไหลผ่าน  
 ขดลวดฟิลต์ค้อยซึ่งการควบคุมกระแสฟิลต์ค้อยนี้จะควบคุมด้วย วงจร  
 แปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง (AC to DC Converters) แบบ  
 ครึ่งคลื่นเฟสเดียว โดยใช้ SCR เบอร์ S6025L ควบคุมกระแสของขดฟิลต์  
 ค้อย ซึ่งขาคัดของ SCR จะได้รับสัญญาณจุดชนวนจากไมโครคอน  
 โทรลเลอร์โดยผ่านทางออฟไต์ PC8177 ดังแสดงในรูปที่ 8

เนื่องจากขณะเริ่มเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะไม่มีแหล่งจ่าย  
 ไฟเลี้ยงให้แก่เครื่องควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าไมโครคอนโทรลเลอร์จะ  
 ไม่สามารถทำงานได้ จึงไม่สามารถสร้างมุมจุดชนวนให้แก่ขาคัดของ

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สามารถผลิตไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงแก้ไข  
นำตัวต้านทานที่มีค่าตรงเพื่อจุดชดเชย SCR ทำให้เครื่อง  
สามารถผลิตไฟฟ้าออกมาได้ ซึ่งจะมีไฟเลี้ยงจ่ายให้กับเครื่อง  
แรงดันไฟฟ้า และเมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ทำงานจะ  
จุดชดเชยที่เหมาะสมแทนการต่อตรงของหน้าตัวต้านทาน  
กับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ที่ 395 โวลต์



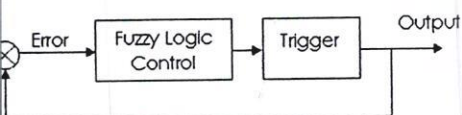
รูปที่ 8 วงจรควบคุมกระแสฟิลด์คอล์ย



รูปที่ 9 รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดฟิลด์คอล์ย

จิก

การรักษาระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟสนี้  
คอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 16F877 ทำหน้าที่  
ด้วยหลักการของฟัซซีลอจิกในการกำหนดมุมจุดชดเชยของ  
มุมการจ่ายกระแสให้กับขดลวดฟิลด์คอล์ย เพื่อรักษาระดับแรงดัน  
กำเนิดไฟฟ้าให้คงที่แม้โหลดมีการเปลี่ยนแปลง



อะแกรมการทำงานของการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

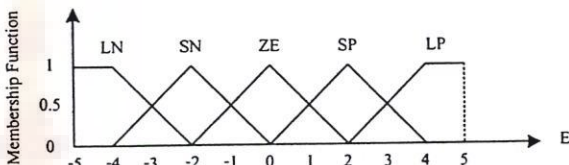
ของฟัซซีลอจิกจะทำการฟัซซีฟิเคชันของอินพุต ซึ่งเป็นการ  
ระบบ ห่างฟัซซีของอินพุต และทำการสร้างระดับความ  
ที่เป็นไปได้ โดยจะกำหนดให้มีอินพุตของระบบ 2 ตัว คือ  
1) ค่าความผิดพลาด (Error, E) ซึ่งหาได้จากความแตกต่าง  
แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ กับแรงดันไฟฟ้าที่อ้างอิง

$$= V_{ref}(\text{Reference Voltage}) - V_p(\text{Process Voltage}) \quad (1)$$

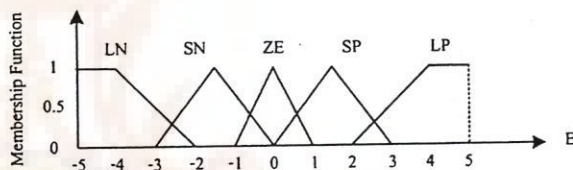
2) ค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด (Error Change,  $E_{ch}$ )  
ซึ่งหาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าความผิดพลาดล่าสุด (Late Error)  
กับค่าความผิดพลาดก่อนหน้านั้น (Previous Error)

$$\text{Error Change}(E_{ch}) = E_i(\text{Late Error}) - E_p(\text{Previous Error}) \quad (2)$$

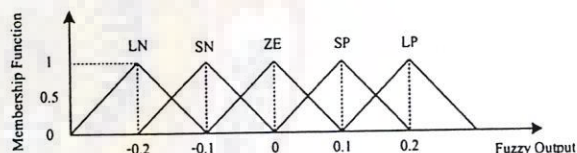
โดยตัวแปรทางอินพุตทั้ง 2 ตัวนี้ต้องนำมาผ่านขั้นตอนของการ  
ฟัซซีฟิเคชันในรูปของฟัซซีของอินพุต โดยการเปรียบเทียบค่าของตัว  
แปรทางอินพุตกับค่าควอนไทซ์(Quantized) ที่กำหนดขึ้น ทำให้  
สามารถหาจำนวนของอินพุตที่จะนำมาทำฟัซซีฟิเคชันได้



รูปที่ 11 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิก 1: Error  
Frequency (E) ในระบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 12 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิก 2: Error Change  
Frequency ( $E_{ch}$ ) ในระบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 13 แสดงฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของเอาต์พุต  
ฟัซซีลอจิกในระบบควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ค่าเอาต์พุตฟัซซีลอจิกทั้งหมดของทุกกรณีที่เกิดขึ้นในระบบการ  
ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งได้จากการคำนวณโดยกฎฟัซซีลอจิก

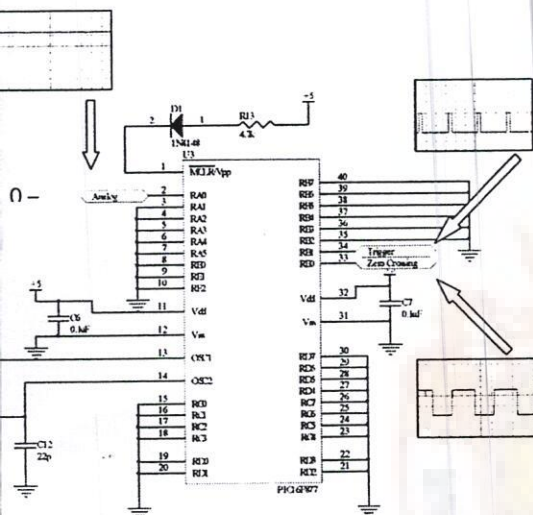
E	$E_{ch}$	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	-5	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15
-4	-4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15
-3	-3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.225	-0.225	-0.225	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075
-2	-3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.15	-0.15	-0.15	0	0	0	0	0
-1	-0.225	-0.225	-0.225	-0.15	-0.15	-0.15	-0.075	0	0	0.075	0.075	0.075
0	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	0	0	0	0.15	0.15	0.15
1	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	-0.075	0.075	0.075	0.075	0.225	0.225	0.225
2	0	0	0	0	0	0	0.15	0.15	0.15	0.3	0.3	0.3
3	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.075	0.225	0.225	0.225	0.3	0.3	0.3
4	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
5	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3



1 จะเป็นเงื่อนไขที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุม  
 เพื่อให้สามารถควบคุมรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ที่  
 และ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้า ระบบควบคุม  
 จะทำการหาค่าในตารางใหม่และทำการ คีพีซีพีเคชั่นเพื่อ  
 มุมเฟสจุดชนวนที่ขาเกตของ SCR ใหม่ ซึ่งค่าเอาต์พุตของพีซี  
 การหาค่าการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสนั้นเอง ทั้งนี้มุมเฟสที่จะ  
 R จะมีค่าเท่าไรนั้นก็ขึ้นอยู่กับค่าอินพุตทั้ง 2 ตัวคือ ค่า  
 Error Change( $E_{cb}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามตารางที่ 1

หลักการพีซีซีลอจิกที่ได้จะถูกนำมาเขียนด้วยโปรแกรม  
 คอมไพเลอร์เป็นไฟล์นามสกุล .HEX แล้วโปรแกรมให้แกไมโคร  
 ทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยหลักการของพีซีซี  
 ณะการต่อใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877

รูปที่ 14

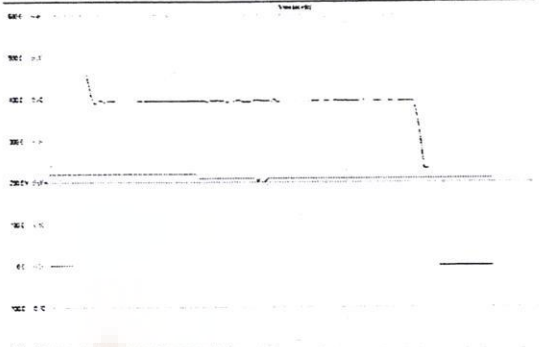


ณะการต่อใช้งานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877

รูปที่ 15

การทดสอบเครื่องควบคุมระดับแรงดันจะใช้ร่วมกับเครื่อง  
 3 เฟส แบบซิงโครนัส ชื่อ CATERPILLAR โมเดล SR-4  
 50 kW มีความเร็ว 1500 รอบต่อนาที ความถี่ 50 Hz มี  
 ตอร์ฟลักซ์คอย 22.5 V 8 A โดยทำการทดสอบสภาวะการ  
 แรงดันในขณะไม่มีโหลด สภาวะโหลดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย  
 โหลดเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด การวัดระดับแรงดันและ  
 จะใช้เครื่องมือวัดชื่อ Fluke รุ่น 43B ซึ่งเป็นเครื่องวัด  
 งานไฟฟ้าที่สามารถเก็บข้อมูลแบบค่าล็อกได้  
 สอบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิด  
 ไม่มีโหลด เพื่อทดสอบตอบสนองว่าสามารถควบคุมแรงดันได้  
 การทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 15

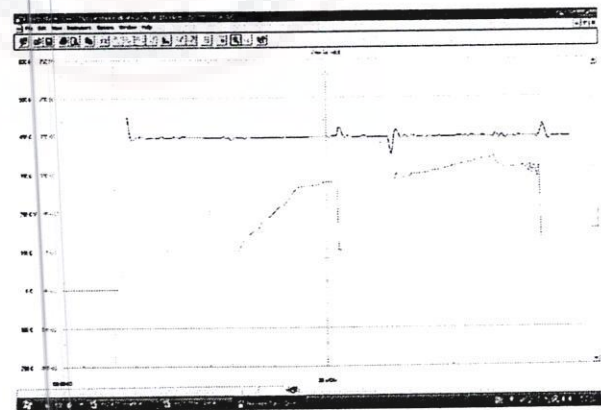


รูปที่ 15 กราฟแสดงผลตอบสนองในขณะไม่มีโหลด

จากรูปที่ 15 แสดงผลตอบสนองในสภาวะไม่มีโหลด จะเห็น  
 ได้ว่า ช่วงแรกซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นสตาร์ทเครื่องยนต์ แรงดันเกิดการโอ  
 เวอร์ชู้ต เพราะสาเหตุจากไมโครคอนโทรลเลอร์ยังไม่ทำงาน แต่จะใช้  
 วิธีการจุดชนวนที่ขาเกตโดยตรงเพื่อเป็นการกระตุ้นให้เครื่องกำเนิด  
 ไฟฟ้าสร้างแรงดันไฟฟ้ามาจ่ายให้กับชุดควบคุมระดับแรงดัน เมื่อ  
 ไมโครคอนโทรลเลอร์ในชุดควบคุมระดับแรงดันเริ่มทำงานแล้ว รีเลย์จะ  
 สลับให้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งประมวลผลด้วยหลักการของพีซีซี  
 ลอจิกคำนวณหามุมเฟสที่เหมาะสมและควบคุมมุมจุดชนวนของ SCR  
 เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ที่ 395 โวลต์

#### 4.2 การทดสอบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขณะโหลดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

การทดสอบนี้จะใช้ตั้งน้ำผสมเกลือเป็นโหลดให้กับเครื่อง  
 กำเนิดไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนการทดลองจะทำการจุ่มแท่งอิเล็กโทรดลงใน  
 น้ำเกลือ โดยจะเพิ่มความลึกหรือจุ่มแท่งอิเล็กโทรดลงไปเรื่อยๆ จะทำให้  
 กระแสเพิ่มขึ้นตามความลึกของการจุ่มแท่งอิเล็กโทรด จนกระทั่งกระแส  
 ประมาณ 100 แอมป์ ซึ่งผลการทดลองของการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้า  
 ยังคงสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ได้แม้ว่าโหลดมีการ  
 เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 กราฟแสดงผลตอบสนองในสภาวะโหลดเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

ค่าความผิดพลาดของแรงดัน

แรงดันไฟฟ้าที่ กำหนด (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้า จริง (โวลต์)	กระแส (แอมป์)	ค่าความ ผิดพลาด ของแรงดัน
395	395	72	0%
395	395	83	0%
395	396	84	0.2%
395	396	86	0.2%
395	396	90	0.2%
395	397	90	0.5%

ทดสอบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากรณีโหลด

ทันทีที่ทันใด

การทดสอบรักษาระดับแรงดันกรณีนี้จะทดสอบการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าขณะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดแบบทันทีทันใด โดยที่ขณะไม่มีโหลด แล้วมีโหลดทันที 100 แอมป์ หรือ 200 แอมป์ และปลดโหลดทั้งหมดเป็น 0 แอมป์ การทดสอบนี้จะจุ่มแท่งอิเล็กโทรดลงไปในความลึกระดับ 100 มม. ที่ยังไม่เปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ เมื่อแรงดันไฟฟ้าคงที่แล้วจึงทำการเปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์เพื่อเพิ่มโหลดแบบทันทีทันใดขนาด 100 แอมป์ เห็นได้ว่าขณะเพิ่มโหลดขนาด 100 แอมป์ทันทีทันใดจะทำการลดแรงดันลงไปที่ 360 โวลต์ แต่ระบบฟิวส์ลอคจะควบคุมให้เพิ่มขึ้นจนสามารถรักษาระดับแรงดันให้คงที่ที่ 395 โวลต์ ประมาณ 4 วินาที และเมื่อแรงดันคงที่ขณะมีโหลดประมาณ 100 แอมป์แล้วทำการทดสอบปิดเซอร์กิตเบรกเกอร์ เพื่อทำการปลดโหลดทันทีทันใด จะเห็นได้ว่าทำให้เกิดแรงดันเกินที่ 4 โวลต์ แต่ระบบฟิวส์ลอคจะควบคุมระดับแรงดันให้คงที่ที่ 395 โวลต์ได้โดยใช้เวลา 4-5 วินาที เช่นเดียวกัน

การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ขนาด 8 บิต ให้ควบคุมการทำงานของฟิวส์ลอคซึ่งเป็นการคำนวณด้วยระบบควบคุมระดับแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 3 เฟส ที่เกิดแรงดันที่แรงดันอ้างอิงที่ 395 โวลต์ได้ทั้งในสภาวะไม่มีโหลด และสภาวะโหลดเปลี่ยนแปลงแบบทันทีทันใด และสภาวะโหลดเปลี่ยนแปลงแบบค่อยๆ มีความคลาดเคลื่อนของการรักษาระดับแรงดันไม่เกิน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Brock J. LaMeres, M.tlashem Nehrir, " Fuzzy Logic Based Voltage Controller for a Synchronous Generator" IEEE Computer Application in Power, 1999
- [2] A.Darabi,S.A. Soleamani nad A.Hassania, "Fuzzy Based Digital Automatic Voltage Regulator of a Synchronous Generator with Unbalanced Load", American J. of Engineering and Applied Sciences, 2008



นายสัญญา ศาสสุข สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลศรีวิชัย ต. บ่อยาง อ.เมือง จ.สงขลา  
90000. Email: psunya@hotmail.com



นายคนโท ปานทองคำ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลศรีวิชัย ต. บ่อยาง อ.เมือง จ.สงขลา  
90000



นายสุกชัช อรุณพันธ์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี  
ราชมงคลศรีวิชัย ต. บ่อยาง อ.เมือง จ.สงขลา  
90000